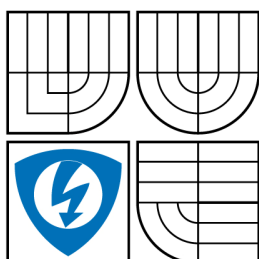


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# KMITOČTOVÉ FILTRY S PROUDOVÝMI AKTIVNÍMI PRVKY

FREQUENCY FILTERS USING CURRENT ACTIVE ELEMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. RADEK HOMOLA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. JAROSLAV KOTON, Ph.D.**

BRNO 2009

>>Vložit zadání práce<<

## ANOTACE

Tato diplomová práce pojednává o návrhu kmitočtových filtrů s proudovými aktivními prvky MO-CF, DCCA a CC. V úvodní části jsou představeny proudové aktivní prvky, jejich vlastnosti, struktura a využití.

V práci je popsán postupný návrh univerzálního filtru. S využitím aktivních prvků byl sestaven univerzální filtr umožňující změny základních parametrů (jakost a mezní kmitočet). Při tomto návrhu byl použit program SNAP a dané simulace charakteristik byly provedeny v OrCAD-PSpice. Pro řízení změny jakosti a mezního kmitočtu byl využit aktivní prvek DCCA. Pomocí programu EAGLE byl vytvořen plošný spoj univerzálního řízeného filtru. Vytvořený vzorek byl změřen pro jednotlivé typy filtru, různé jakosti a mezní kmitočty. Tyto hodnoty byly porovnány s hodnotami simulovaného filtru .

### **Klíčová slova:**

proudový konvektor, aktivní prvek, aktivní filtr, multifunkční filtr, vícevýstupový proudový sledovač, digitálně řízený proudový zesilovač, autonomní obvod

## **ABSTRACT**

This master's thesis is about MO-CF, DCCA and CC frequency filters with current active elements proposal. Current active elements, their features, structure and utilization are shown in introduction.

A progress propose of universal filter is described in thesis. With the use of active elements has been established an universal filter with basic parameter changes capability (quality and limit frequency). SNAP software was used in this propose and the characteristics simulation have been done in OrCad-PSpice. For control changes of quality and limit frequency was used active element DCCA.

The main circuit board of universal controlled filter was made with the EAGLE software. Created sample was measured for each type of filter, the different quality and limit frequency. These values were compared with simulated values of the filter.

### **Keywords:**

current conveyor, active element, active filter, multifunction filter, multiple output current follower, digitally controlled current amplifier, autonomous circuit

HOMOLA R. *Návrh kmitočtových filtrů s proudovými konvejory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma "**Návrh kmitočtových filtrů s proudovými aktivními prvky**" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne 15.5.2009

.....  
(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jaroslavu Kotonovi, Ph.D. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne 3.6.2007

.....  
(podpis autora)

## SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Název
CC	Current Conveyor – proudový konvektor
CCCS	Current Controlled Current Source – zdroj proudu řízený proudem
CCI	First Generation Current Conveyor – proudový konvektor první generace
CCI-	Negative First Generation Current Conveyor – negativní proudový konvektor první generace
CCII	Second Generation Current Conveyor – proudový konvektor druhé generace
CCIII	Third Generation Current Conveyor – proudový konvektor třetí generace
CCVS	Current Controlled Voltage Source – zdroj napětí řízený proudem
CM	Current mode – proudový mód
DCCA	Digitally Controlled Current Amplifier -digitálně řízený proudový zesilovač
DP	Dolní propust
MO-CF	Multiple Output Current Follower-vícevýstupový proudový sledovač
FČ	Fázovací člen
GCC	General Current Conveyor – obecný proudový konvektor
GVC	General Voltage Conveyor – obecný napěťový konvektor
HP	Horní propust
ICCI	Inverting First Generation Current Conveyor – invertující proudový konvektor první generace
OZ	Operační zesilovač
PP	Pásmová propust
PZ	Pásmová zadrž
UCC	Universal Current Conveyor – univerzální proudový konvektor
UVC	Universal Voltage Conveyor – univerzální napěťový konvektor
VCCS	Voltage Controlled Current Source – zdroj proudu řízený napětím
VCVS	Voltage Controlled Voltage Source – zdroj napětí řízený napětím
VM	Voltage mode – napěťový mód



## SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Název
$a, b, c$	Koeficienty přenosu aktivního prvku
$C$	Kapacita
$D$	Charakteristický polynom obvodu
$E$	Obecný vstupní signál
$F$	Kmitočet
$F_0$	Charakteristický či mezní kmitočet filtru
$G$	Vodivost
$I$	Proud (tučně Laplaceův obraz, stojatě označení vstupu či výstupu obvodu)
$K, K(p)$	Přenos napětí nebo proudu (Laplaceův obraz)
$L$	Indukčnost
$N$	Řád filtru
$n$	Proudový přenos aktivního prvku
$p = j\omega$	Komplexní proměnná – Laplaceův operátor
$R$	Odpor
$U$	Napětí (tučně Laplaceův obraz, stojatě označení vstupu či výstupu obvodu)
$Y$	Admitance
$Y, X, Z$	Označení svorek proudového konveju
$Y_{1+}, Y_{2-}, Y_{3+}, X, Z_{1+}, Z_{1-}, Z_{2+}, Z_{2-}$	Označení svorek univerzálního proudového konveju
$Z$	Impedance
$\omega = 2\pi f$	Úhlový kmitočet

## OBSAH

1	Cíl, úvod a motivace .....	15
2	Současné problémy a jejich řešení.....	16
3	Kmitočtové filtry .....	17
3.1	Rozdělení filtrů .....	17
3.2	Aproximační funkce pro návrh filtru.....	19
3.3	Režimy daných obvodů .....	19
3.3.1	Napěťový mód .....	20
3.3.2	Proudový mód .....	20
3.3.3	Smíšený mód .....	21
4	Aktivní prvky.....	22
4.1	Zobecněný proudový prvek.....	22
4.2	Proudový konvektor .....	23
4.3	Vícevýstupový proudový sledovač MO-CF.....	25
4.4	Digitálně řízený proudový zesilovač .....	26
5	Metody návrhu filtrů.....	27
5.1	Návrh filtru pomocí autonomního obvodu .....	27
5.1.1	Postup návrhu .....	27
5.1.2	Návrh obecného autonomního obvodu.....	27
5.1.3	Výpočet charakteristické rovnice $D(p)$ .....	28
5.1.4	Volba jednotlivých prvků rovnice .....	28
5.1.5	Určení přenosových funkcí.....	29
5.2	Metoda pomocí signálových toků.....	29
	kde $Q$ je možné řídit pomocí $G_1$ nebo $G_4$ .....	31
5.3	Další metody pro návrh filtrů .....	32
5.3.1	Metoda využívající syntetické prvky.....	32
5.3.2	Metoda využívající imitaci vyšších řádů .....	32
5.3.3	Metoda transformace příčkových článků RLC.....	33
5.3.4	Metoda pomocí frekvenčně závislých děličů .....	33
5.3.5	Metoda využívající integrátorové bloky .....	34
5.3.6	Metoda stavové proměnné.....	34
5.3.7	Metoda LEAP-FROG .....	34
6	Návrhy filtrů .....	35
6.1	Volba hodnot součástek.....	35
6.2	Filtr s aktivním prvkem DCCA pro řízení jakosti a mezního kmitočtu .....	36
6.2.1	Návrh filtru pro změnu jakosti.....	37
6.2.1.1	Charakteristiky navrhovaného filtru .....	38
6.2.2	Návrh filtru pro nezávislou změnu jakosti a mezního kmitočtu.....	40
6.2.2.1	Vzorce pro výpočet hodnot pasivních součástek, jakosti a mezního kmitočtu .	41
6.2.2.2	Hodnoty pasivních součástek pro daný filtr .....	42
6.2.2.3	Charakteristiky navrhovaného filtru .....	43
6.3	Filtr s využitím aktivního prvku MO-CF .....	44
6.3.1	Hodnoty pasivních součástek pro daný filtr .....	46
6.3.2	Charakteristiky navrhovaného filtru .....	46
7	Praktické ověření navrhovaných filtrů .....	48

7.1	Přenosové funkce daného obvodu závislosti na vstupu a výstupu .....	50
7.2	Změřené hodnoty z výrobku.....	55
8	Závěr.....	60
9	Seznam příloh.....	61
	Seznam literatury .....	65

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obr. 3.1</b> Obvod pracující v napěťovém módu.....	20
<b>Obr. 3.2</b> Obvod pracující v proudovém módu.....	20
<b>Obr. 4.1</b> Obecný proudový prvek .....	22
<b>Obr. 4.2</b> Obecný proudový konvektor GCC.....	24
<b>Obr. 4.3</b> Značka univerzálního proudového konvektoru.....	24
<b>Obr. 4.4</b> Vícevýstupový proudový sledovač.....	25
<b>Obr. 4.5</b> Realizace MO-CF s využitím univerzálního proudového konvektoru.....	26
<b>Obr. 4.6</b> Schématická značka DCCA .....	26
<b>Obr. 5.1</b> Obecné zapojení aktivních prvků do admitanční sítě.....	28
<b>Obr. 5.2</b> Zapojení impedančního/ admitančního děliče v a) proudovém režimu b) napěťovém režimu .....	33
<b>Obr. 6.1</b> Zapojení autonomního obvodu s dvěma CCII+/-.....	36
<b>Obr. 6.2</b> Zapojení obvodu s dvěma CCII+/- a jedním DCCA.....	37
<b>Obr. 6.3</b> Přenosové charakteristika horní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočet $f=970\text{Hz}$ pro různé jakosti.....	38
<b>Obr. 6.4</b> Přenosové charakteristika dolní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočet $f=970\text{Hz}$ pro různé jakosti.....	39
<b>Obr. 6.5</b> Přenosové charakteristika pásmové propusti pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočet $f=970\text{Hz}$ pro různé jakosti.....	39
<b>Obr. 6.6</b> Zapojení autonomního obvodu s dvěma CCII+/- a třemi DCCA .....	40
<b>Obr. 6.7</b> Přenosové charakteristiky filtru pro pásmovou propust pracující v proudovém módu navrhované pro jakost $Q=1$ pro různé kmitočty.....	43
<b>Obr. 6.8</b> Přenosové charakteristiky filtru pro pásmovou propust pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočet $f=2,9\text{KHz}$ pro různé jakosti.....	43
<b>Obr. 6.9</b> Přenosové charakteristika různých filtrů pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočet $f=4,86\text{KHz}$ a jakost $Q=1$ .....	44
<b>Obr. 6.10</b> Elektrické schéma obvodu s dvěma MO-CF.....	44
<b>Obr. 6.11</b> Přenosové charakteristiky dolní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočet $f=1\text{KHz}$ při různých aproximacích.....	46
<b>Obr. 6.12</b> Přenosové charakteristiky horní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočet $f=10\text{KHz}$ při různých aproximacích.....	47
<b>Obr. 6.13</b> Přenosové charakteristiky pásmové propusti pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočet $f=1\text{MHz}$ při různých aproximacích.....	47
<b>Obr. 7.1</b> Schématická značka DCCA / Nahrazení struktury DCCA pomocí konvektoru a EL 2082 .....	48
<b>Obr. 7.1</b> Elektrické schéma řízeného filtru s využitím EL 2082 .....	49
<b>Obr. 7.2</b> Přenosové charakteristiky multifunkčního filtru pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočet $f=970\text{Hz}$ a jakost $Q=1$ .....	51
<b>Obr. 7.3</b> Přenosové charakteristiky pásmové propusti pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočet $f=4850\text{Hz}$ pro různé jakosti.....	52
<b>Obr. 7.4</b> Přenosové charakteristika dolní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočet $f=1950\text{Hz}$ pro různé jakosti.....	52

<b>Obr.7.5</b> Přenosové charakteristika horní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočty $f=485\text{Hz}$ pro různé jakosti. ....	53
<b>Obr.7.6</b> Přenosové charakteristika horní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro různé mezní kmitočty s jakostí $Q=1$ . ....	53
<b>Obr.7.7</b> Přenosové charakteristika dolní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro různé mezní kmitočty s jakostí $Q=1$ . ....	54
<b>Obr.7.8</b> Přenosové charakteristika pásmové propusti pracující v proudovém módu navrhované pro různé mezní kmitočty s jakostí $Q=1$ . ....	54
<b>Obr.7.9</b> Přenosové charakteristiky jednotlivých typů filtrů pracující v proudovém módu navrhované pro různé ..... jakost $Q=10$ a stejný kmitočet $f$ . ....	56 56
<b>Obr.7.10</b> Přenosové charakteristiky horní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro stejnou jakost $Q$ ..... a kmitočet $f$ . ....	56 56
<b>Obr.7.11</b> Přenosové charakteristiky dolní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro různé jakosti a stejný kmitočet $f=4858\text{Hz}$ . ....	57
<b>Obr.7.12</b> Přenosové charakteristiky dolní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro jakost $Q=10$ ..... a různé kmitočty. ....	57 57
<b>Obr.7.13</b> Přenosové charakteristiky pásové propusti pracující v proudovém módu navrhované pro různé jakosti ..... a konstantní kmitočet $f=971\text{Hz}$ . ....	58 58
<b>Obr.7.14</b> Přenosové charakteristiky pásmové propusti pracující v proudovém módu navrhované pro jakost $Q=0,7$ ..... a různé kmitočty. ....	58 58
<b>Obr.7.15</b> Přenosové charakteristiky horní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro jakost $Q=0,7$ ..... a různé kmitočty. ....	59 59
<b>Obr.7.16</b> Přenosové charakteristiky dolní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro různé jakosti a stejný kmitočet . ....	59
<b>Obr.9.1</b> Schématické znázornění součástek plošného spoje.....	62
<b>Obr.9.2</b> Deska plošného spoje strana TOP . ....	63
<b>Obr.9.3</b> Deska plošného spoje strana BOTTOM . ....	63
<b>Obr.9.4</b> Deska plošného osazení součástek TOP . ....	63
<b>Obr.9.5</b> Deska plošného osazení součástek strana BOTTOM . ....	64
<b>Obr.9.6</b> Deska plošného osazení součástek TOP . ....	64
<b>Obr.9.7</b> Deska plošného osazení součástek strana BOTTOM . ....	64

## SEZNAM TABULEK

<b>Tab.3-1</b> Tabulka znázorňující typy filtrů 2. řádu a jejich přenosové funkce.....	18
<b>Tab. 3-2</b> Tabulka koeficientů přenosových funkcí pro aproximaci filtru druhého řádu.....	19
<b>Tab.4-1</b> Duální varianty proudových konvektorů.....	24
<b>Tab. 5-1</b> Vlastností imitancních dvojpólů.....	32
<b>Tab. 5-2</b> Transformace RLC prvků.....	33
<b>Tab. 6-1</b> Tabulka vypočtených hodnot pasivních prvků.....	42
<b>Tab. 6-2</b> Tabulka vypočtených hodnot pro filtr s MO-CF.....	46
<b>Tab. 7-1</b> Tabulka určující typ filtru v závislosti na jednotlivých vstupech/výstupech .....	50
<b>Tab. 7-2</b> Tabulka určující převod mezi řídicím zesílením $V_{set}$ a jakostí $Q$ a mezním kmitočtem $f$ .....	51
<b>Tab. 7-3</b> Tabulka porovnávající jakosti u pásmové propusti.....	55

## 1 Cíl, úvod a motivace

Cílem diplomové práce je seznámit se s vlastnostmi proudových aktivních prvků: MO-CF (Multiple Output Current Follower) a DCCA (Digitally Current Amplifier) s jejich využití v návrhu univerzálních řídicích kmitočtových filtrů. Požadavkem na obvodovou strukturu filtru bylo umožnit změny základních parametrů (činitel jakosti, charakteristický kmitočet, zesílení v pásmu propustnosti) nezávisle na ostatních. V poslední části se měl navrhnout daný obvod osadit součástkami, změřit a porovnat se simulovaným obvodem.

Aktivní prvky můžeme dělit z mnoha hledisek díky jejich rozsáhlým vlastnostem a využitelnosti.

Z hlediska vlastností daných aktivních prvků se dají aplikovat do mnoha obvodů, z nichž je lze využít i k návrhu kmitočtových filtrů. Díky jednotlivým přenosovým funkcím je možné sestavit různé typy a řády filtrů pro dolní propust, horní propust, pásmovou propust, pásmovou zádrž popřípadě fázovací článek. Při návrhu se používá několik metod pro jejich realizaci a sestavení. Tyto bloky mohou pracovat v proudovém, napěťovém nebo smíšeném módu.

V práci jsou zmíněny metody návrhu a jejich prohloubení v metodě autonomních obvodů, které využívají obecné zapojení proudových prvků a admitancí s charakteristickou rovnicí ve tvaru součtu součinnů  $Y_x$ , ze kterých se pak určuje přenosové funkce.

## 2 Současné problémy a jejich řešení

S rozvojem elektroniky je snaha u elektrických zařízení o co nejmenší rozměry, nejvyšší výkony a přitom od výrobků se očekávají co nejlepší vlastnosti: velká spolehlivost, malá spotřeba a minimální ovlivňování rušivými vlivy či jejich vlastní rušení. Při návrhu kmitočtových filtrů se směřuje k rozšíření [8] šířky kmitočtového pásma zpracovávaného signálu a snížení napětí při dosažení dostatečného dynamického rozsahu a odstupu signálu od šumu. Toho lze právě lépe dosáhnout vývojem návrhu obvodů, který bude pracovat v proudovém nebo smíšeném režimu. Proudový mód znamená, že informace v obvodech je přenášena proudovými signály. Pro návrh většiny filtrů jsou doposud převážně používány operační zesilovače, které pracují ve dvou zpětných vazbách. Mezi nejčastější vazby patří stále ještě vazba napěťová - nevýhoda spočívá však v kolísání šířky přenášeného pásma na závislosti nastavení zesílení. Při proudové zpětné vazbě dosáhneme větší šířky pásma při nezávislosti na zesílení. V této práci se budu z hlediska vývoje ubírat k realizaci návrhu kmitočtových filtrů s proudovými aktivními prvky, které již ve zmíněných bodech dosahují lepších vlastností.



### 3 Kmitočtové filtry

Kmitočtové filtry jsou lineární obvody, které mění spektrum procházejícího signálu. Filtry, kde spektrální složka projde bez významného omezení, se nazývá propustné pásmo a s potlačením nepropustné. Z hlediska konstrukce použitých součástek můžeme filtry rozdělit na pasivní a aktivní.

Pasivní pak mohou být obvody LC, RC, RLC. Filtry neobsahující odpory jsou z hlediska energetického výhodnější, protože v nich nedochází ke ztrátám.

Aktivní filtry jsou výhodné, v možnosti realizace elektronické indukčnosti vhodným zapojením aktivního prvku a kondenzátoru ve zpětné vazbě. I když je cívka teoreticky vhodná pro realizaci filtrů, prakticky má nevýhodu v jak v rozměrových a cenových oblastech, tak i v oblastech vytváření prvku se žádanou hodnotou indukčnosti. Často se u ní projevují nežádoucí vlastnosti jako je činný odpor vinutí a parazitní kapacita. U aktivních kmitočtových filtrů lze pak dosáhnout přenos propustné části větší než jedna, což lze považovat za výhodu.

Mimo tyto filtry existují ještě elektromechanické nebo číslicové. U mechanických se využívá mechanických kmitů piezoelektrického krystalu a u číslicových transformace signálu do spektrální oblasti.

Kmitočtové filtry se využívají v rozsáhlých oblastech elektroniky a elektrotechniky, elektroakustiky (výhybky), převodníků A/D (antialiasingový filtr), měřicí techniky (selektivní výběr měření), silnoproudé techniky (odrušovací filtry). Díky těmto aktivním prvkům můžeme vytvářet různé kmitočtové filtry sloužící k filtrování různých kmitočtů. [1]. Podle jejich zapojení pak vytváříme jednotlivé druhy filtrů.

#### 3.1 Rozdělení filtrů

Obecně lze popsat pět základních typů kmitočtových filtrů:

- dolní propust (horní zádrž),
- horní propust (dolní zádrž),
- pásmová propust,
- pásmová zádrž,
- fázovací členek.

Danou přenosovou funkci lze popsat obecným vztahem:

$$K(p) = \frac{\sum_{k=0}^{m} a_k(p)^k}{\sum_{i=0}^{n} b_i(p)^i} = \frac{a_0 + a_1 p + \dots + a_{m-1} p^{m-1} + a_m p^m}{b_0 + b_1 p + \dots + b_{n-1} p^{n-1} + b_n p^n}. \quad (3.1)$$

Nejčastěji se užívají aktivní filtry 2. řádu tab.3-1. Filtry nižšího řádu jsou málo citlivé na tolerance parametrů používaných obvodových prvků, vyšší řády mají větší počet dílčích přenosových funkcí a tím jsou nepraktické [2] a neekonomické. Danou řád volíme podle kritérií využití v oblasti potřebné pro filtrování. V našem případě se však budeme zabývat pouze filtry druhého řádu.

**Tab.3-1** Tabulka znázorňující typy filtrů 2. řádu a jejich přenosové funkce.

<b>Typ filtru</b>	<b>Popis</b>	<b>Tvar přenosové funkce</b>	
<b>Dolní propust</b>	propouští nižší kmitočty a zadržuje vyšší kmitočty	$K(p) = \frac{a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}$	(3.2)
<b>Horní propust</b>	zadržuje nižší kmitočty a propouští vyšší kmitočty	$K(p) = \frac{a_2 p^2}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}$	(3.3)
<b>Pásmová propust</b>	propouští určité kmitočtové pásmo a ostatní potlačuje	$K(p) = \frac{a_1 p}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}$	(3.4)
<b>Pásmová zádrž</b>	potlačuje určité kmitočtové pásmo a ostatní propouští	$K(p) = \frac{a_2 p^2 + a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}$	(3.5)
<b>Fázovací článek</b>	přenos tohoto obvodu je roven jedné, a proto je modulová charakteristika kmitočtově nezávislá. Tento obvod pouze mění fázi.	$K(p) = \frac{p^2 - b_1 p + b_0}{p^2 + b_1 p + b_0}$	(3.6)
<b>Všeobecný filtr</b>	je složen z přenosů filtrů dolní propusti, horní propusti a pásmové propusti	$K(p) = \frac{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}$	(3.7)

### 3.2 Aproximační funkce pro návrh filtru

Podle zadaných provozních vlastností (kmitočtové, přechodové charakteristiky) se aproximují přenosové funkce. Mezi ně pak patří Butterworthova, Čebyševova, Besselova funkce. Aproximace filtru pro přenosové funkce druhého řádu znázorňuje tab. 3-2 s jednotlivými koeficienty.

**Butterworthova funkce** se vyznačuje maximální plochou modulové charakteristiky v propustném pásmu. Toho je však docíleno snížením malé strmosti v pásmu přechodu a nelineární argumentovou charakteristikou. Modulová charakteristika za mezním kmitočtem vykazuje malý pokles. Přechodová charakteristika má zámkity, které se zvětšují zvyšováním řádu.

**Čebyševovy funkce** jsou založeny na zvlnění (izoextremální) v propustném pásmu. Modulová charakteristika za mezním kmitočtem prudce klesá. V propustném pásmu kmitočtu však není monotónní, ale má zvlněný charakter s konstantním zámkitem. Zvýšení řádu zvyšuje nerovnoměrnost v propustném pásmu. Zámkity jednotkovým skokem jsou podstatně větší než u Butterwortha.

**Besselovy funkce** využívají konstantního skupinového zpoždění a lineární průběh fázové charakteristiky v širokém kmitočtovém pásmu. Vykazují tedy optimální přechodovou charakteristiku. Pokles modulové charakteristiky je však méně strmý než u Butterwortha.

*Tab. 3-2 Tabulka koeficientů přenosových funkcí pro aproximaci filtru druhého řádu*

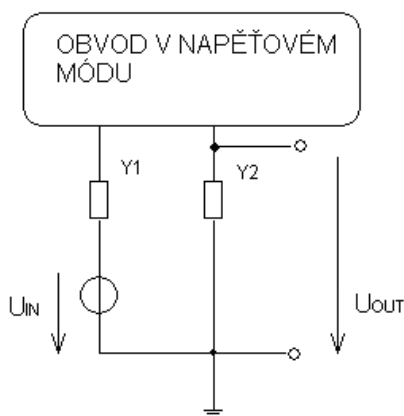
Bessel		Čebyšev se zvlněním 3dB		Butterwort	
$a_{21}$	$b_{21}$	$a_{21}$	$b_{21}$	$a_{21}$	$b_{21}$
1,362	0,618	1,065	1,931	1,414	1

### 3.3 Režimy daných obvodů

Elektrické obvody mohou fungovat v několika režimech podle toho, s jakými signály pracují. V současné době je snaha přecházet z napěťového režimu na proudový nebo smíšený. Tyto režimy totiž umožňují dosáhnout lepších vlastností. Jako jo snižující se napájecí napětí. U napěťového módu dochází ke snížení dynamiky a SNR.

### 3.3.1 Napětový mód

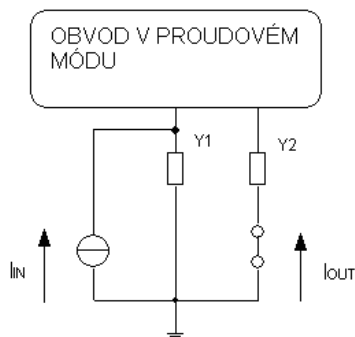
Napětový mód (VM) obr.3.1 je režim, při kterém se využívá signálů napětové odezvy při napětovém buzení obvodu. Tento mód se bývá v klasických obvodech (obvody s operačními zesilovači). Obvod je pak buzen zdrojem napětí, který je připojen mezi pasivní dvojpól a zem a z výstupu je pak sledována napětová odezva snímaná z napětí v uzlu vůči zemi.



*Obr. 3.1 Obvod pracující v napětovém módu.*

### 3.3.2 Proudový mód

Proudový mód obr.3.2 je režim (CM), při kterém se využívá signálů proudové odezvy při proudovém buzení obvodu. Tento mód se začíná stále více uplatňovat hlavně v aktivních filtrech pro oblasti vyšších kmitočtů, kde se nedají už klasické filtry RC použít, protože vlastnosti dostupného reálného OZ to nedovolují. Obvod je tedy buzen zdrojem proudu, který je vhodný pro připojení mezi uzel a zem a z výstupu je pak sledovaná proudová odezva snímaná z proudu tekoucí částí větve mezi dvojpólem a zemí.



*Obr. 3.2 Obvod pracující v proudovém módu.*

### 3.3.3 Smíšený mód

Smíšený mód je režim (C/VM), který pracuje v části obvodu v proudovém módu, nejčastěji jako aktivní prvek nebo funkční blok, ale při zpracovávání v obvodu je používán napěťový signál (V/CM). Pokud pracuje obvod v opačném režimu, tedy pracuje-li v napěťovém módu, ale výsledný obvod zpracovává signál v proudovém (C/VM), využívá buzení zdrojů a odběru signálu z předchozích zapojení obr.3.1, obr. 3.2.

Tento mód se pak rozděluje na:

- smíšený napěťový V/CM při zpracovávání signálu využívá napěťové odezvy při proudovém buzení
- smíšený proudový C/VM při zpracování signálu využívá proudové odezvy při napěťovém buzení

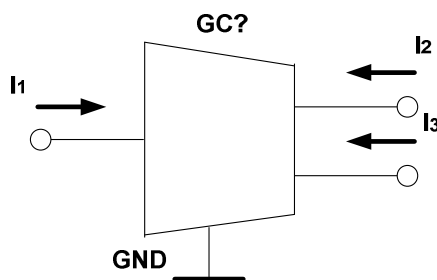
## 4 Aktivní prvky

Aktivní prvky zasáhly do všech odvětví v elektronice, díky svým vlastnostem se začaly používat i v oblasti kmitočtových filtrů. Proto můžeme kmitočtové filtry rozdělit na pasivní (RC, RLC) a aktivní, kde se používají právě aktivní prvky. Často se využívá jako aktivní prvek operační zesilovač, který pracuje v napěťovém módu. Z důvodů přecházení na zpracovávání signálu v proudovém módu, se vyvíjejí stále nové aktivní prvky.

Ty, které se v této práci budou využívat, jsou proudový sledovač CF (Current Follower), vícevýstupový proudový sledovač MO-CF (Multiple Output Current Follower), digitálně řízený proudový sledovač DCCA (Digitally Controlled Current Amplifier) a proudový konvektor (current conveyor). Tyto aktivní součástky jsou mnohobraný, umožňují jednotlivými branami poskytovat určité proudové přenosy. Jejich využití se stále neprosazuje [4] o proti klasickým operačním zesilovačům a stále jsou jen teoretickým prvkem. U nových aktivních prvků se dosahuje zpracování kmitočtů až 100 MHz, což pro běžné RC obvody s operačními zesilovači lze dosáhnout jen s obtížemi.

### 4.1 Zobecněný proudový prvek

Pod pojmem zobecněný proudový aktivní prvek obr.4.1 si můžeme představit součástku obsahující vlastnosti všech aktivních prvků, které pracují v proudovém módu to je režim, při kterém se využívá signálů proudové odezvy při proudovém buzení obvodu. Tyto obecné proudové prvky fungují na principu proudových zrcadel a invertorů, které opakují vstupní signál (proudový) na výstup, popřípadě ho invertují. Díky této součástce si pak můžeme zobecnit všechny možné aktivní prvky.



*Obr. 4.1 Obecný proudový prvek*

Daný prvek můžeme popsat vztahy:

$$i_2 = ai_1, \quad (4.1)$$

$$i_3 = bi_1. \quad (4.2)$$

Pomocí koeficientů  $a$ ,  $b$  můžeme definovat přenos proudu ze vstupu na výstupy. Tyto koeficienty se pak rovnají hodnotám 1 nebo -1. Z těchto rovnic a koeficientů vyplývá, že pokud se koeficient rovná +1, jede o proudové zrcadlo, a pokud je koeficient -1, jedná se o proudový invertor.

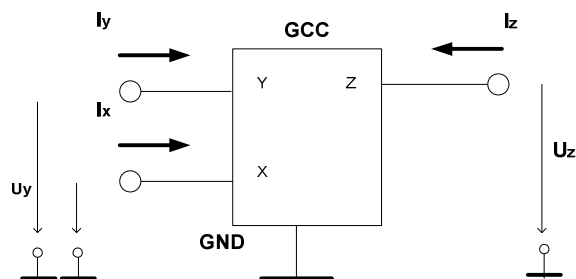
Díky této vlastnosti a využití jednotlivých výstupů (popřípadě dalších vstupů a jejich vlastností) můžeme z daného prvku vytvořit různé typy součástek, podle jednotlivých koeficientů  $a$ ,  $b$  a využitelnosti výstupů. Pak vznikají s využitím dvou výstupů: 2 invertory, 2 zrcadla, 1 zrcadlo a 1 invertor, nebo s využitím jednoho výstupu: jednoduchý invertor, nebo sledovač.

Kvůli těmto základním modelům a vlastnostem pak můžeme vytvářet další konkrétní prvky umožňující rozšíření možností využitelnosti. Mezi ně patří i CC, MO-CF, DCCA.

MO-CF je rozšíření zobecněného aktivního prvku o další výstupy s využitím jednoho vstupu. DCCA je rozšířena na dvě vstupní rozdílové proudové svorky a jednu řídicí s využitím dvou výstupů.

## 4.2 Proudový konvektor

Konvektor je aktivní mnohobran umožňující mezi branami poskytovat určité napěťové a proudové přenosy. Pro jednoduchou realizaci si můžeme proudový konvektor představit jako napěťový operační zesilovač [5] využívající změnu napájecích proudů podle velikosti zpracovávaného signálu. Obsahuje vysokoimpedační vstup  $Y$  a  $X$  s nízkou impedancí se stoprocentní zpětnou vazbou z výstupu operačního zesilovače. Do cesty mezi napájecí zdroje a samotný operační zesilovač jsou vloženy proudová zrcadla, která kopírují [14] proudy tekoucí mezi  $X$  na proudový výstup  $Z$ . Pro návrh se používá obecný proudový konvektor obr.4.2.



**Obr.4.2** Obecný proudový konvektor GCC

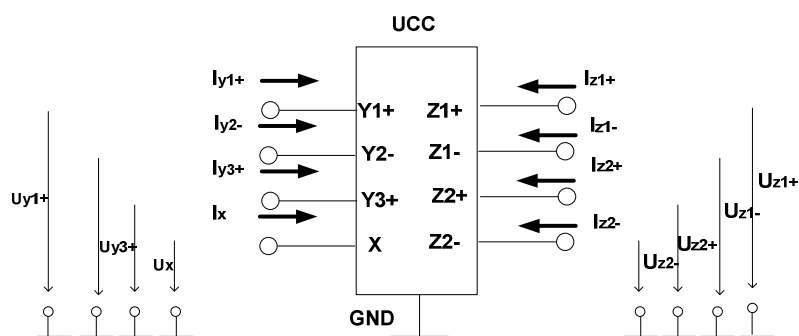
Obecné znázornění matice pro obecný konvektor

$$\begin{bmatrix} U_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a & 0 \\ b & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

**Tab.4-1** Duální varianty proudových konvektorů

GCC	CCI+	CCI-	CCII+	CCII-	CCIII+	CCIII-	ICCI+	ICCI-	ICCI+	ICCI-	ICCI+	ICCI-
<b>a</b>	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
<b>b</b>	1	1	0	0	-1	-1	1	1	0	0	-1	-1
<b>c</b>	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1

Všechny tyto typy konvektorů se dají vytvořit i univerzálním proudovým konvektorem obr.4.3. Je to osmibran, který využívá pouze určité vývody [7] a ostatní jsou uzemněny nebo jsou spojeny s jinými vývody. Má tři vysokoimpedanční vstupní svorky (Y1, Y2, Y3), kde dva jsou rozdílové (Y1, Y2) a dva součtové (Y1, Y3). Kromě těchto vysokoimpedančních vstupů má také vstup nízkoimpedanční X a čtyři proudové výstupy (Z1+, Z2+, Z1-, Z2-), kde Z1-, Z2- jsou inverzní výstupy výstupům Z1+, Z2+. Díky tomuto univerzálnímu aktivnímu prvku můžeme vytvořit jak všechny typy proudových konvektorů, tak i aktivní prvek obr.4.5.

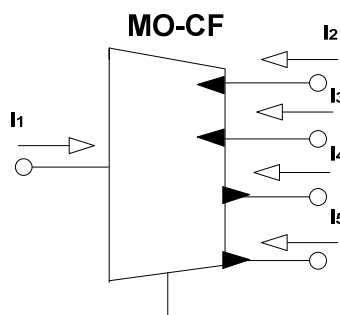


**Obr. 4.3** Značka univerzálního proudového konvektoru.



### 4.3 Vícevýstupový proudový sledovač MO-CF

MO-CF je aktivní proudový prvek (obr.4.4) obsahující jeden proudový vstup a čtyři výstupy. Počet proudových výstupů však není nijak omezen. V případě obvodu na obr. 4.4 daný MO-CF má dvě dvojice mají stejné přenosové vlastnosti. U návrhu obvodů je výhodné, aby výstupy u daných aktivních prvků měly stejnou orientaci proudu kvůli stejnému fázovému zpoždění, které vzniká při průchodu v jednotlivých obvodech. Přes množství popsaných typů CC jsou nejčastěji využívanými CCII nebo jejich variantní řešení z důvodu maximální jednoduchosti vnitřní struktury aktivního prvku. Tato součástka tedy umožňuje všechny možné výstupní vlastnosti, které jsou při návrhu filtru výhodné.



**Obr. 4.4** Vícevýstupový proudový sledovač

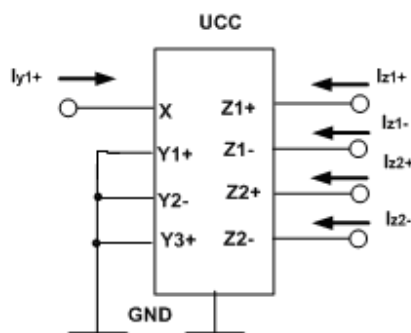
Daný prvek můžeme popsat vztahy:

$$i_2 = i_3 = i_1, \quad (4.4)$$

$$i_4 = i_5 = -i_1. \quad (4.5)$$

Při realizaci pro konkrétní využití se vyberou určité výstupní svorky a nevyužité svorky se uzemní.

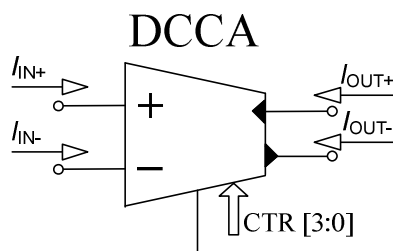
Tento aktivní prvek je možné vytvořit i pomocí univerzálního proudového konveju, který je uveden na obrázku obr. 4.3.



**Obr. 4.5** Realizace MO-CF s využitím univerzálního proudového konveje

## 4.4 Digitálně řízený proudový zesilovač

Aktivní prvky popsané v předchozích kapitolách mají přenos proudu pevně dán a to hodnotami  $\pm 1$ . Aby bylo možné navržené struktury řídit, byl zaveden [23] proudový aktivní prvek DCCA (Digitally Controlled Current Amplifier), jehož schématická značka je uvedena na obr. 4.6.



**Obr. 4.6** Schématická značka DCCA

Tento prvek můžeme popsat vztahy:

$$I_{OUT+} = A_I(I_{IN+} - I_{IN-}) \quad (4.6)$$

$$I_{OUT-} = -A_I(I_{IN+} - I_{IN-}) \quad (4.7)$$

Z rovnice je patrné, že výstupní proudový signál je závislý na rozdílu vstupních proudových signálů a zesílení, které je digitálně řízeno pomocí sběrnice CTRL [3:0]. Rozsah daného zesílení se volí od 3 do 93 po skocích o 3. Díky této součástce pak můžeme vytvářet samotná zapojení nebo výhodným vložением do stávajícím struktur řídit některé ze základních parametrů kmitočtového filtru. Zásadou této vlastnosti pak můžeme měnit jeho základní parametry nezávisle na ostatních.

## 5 Metody návrhu filtrů

Návrhy filtrů se provádějí u aktivních prvků několika metodami, mezi něž patří například:

- metoda návrhu autonomního obvodu
- metoda s využitím syntetických prvků
- metoda využívající integrované bloky
- metoda pomocí signálových toků

### 5.1 Návrh filtru pomocí autonomního obvodu

Návrh filtru pomocí autonomního obvodu využívá obecného zapojení [16] (obecného) aktivního prvku a admitancí s charakteristickou rovnicí ve tvaru součtu součinnů  $Y_x$ , ze kterých pak využíváme jednotlivé funkce. Při zapojení pasivních prvků je snahou, aby jeden konec byl uzemněn. Tím se docílí snadnější realizace v integrovaných obvodech.

#### 5.1.1 Postup návrhu

*Při návrhu postupujeme podle bodů:*

- Návrh obecného autonomního obvodu
- Výpočet charakteristické rovnice  $D(p)$
- Volba jednotlivých prvků rovnice

Pro kmitočtový filtr musí být splněna podmínka, že v charakteristické rovnici se vyskytují všechny mocniny operátoru  $p$  a všechny členy rovnice musí být stejné tedy kladné z důvodů stability.

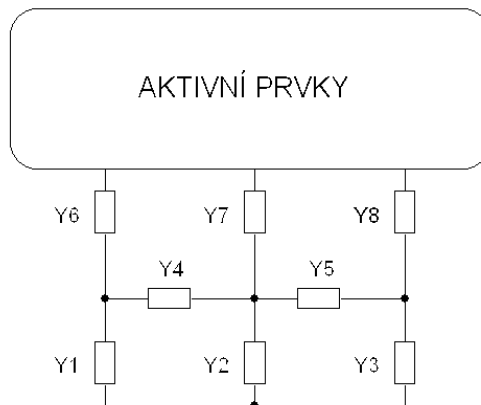
- Určení přenosových funkcí

Buzením zdrojů proudu do uzlů nebo zdroji napětí, které vkládáme do větví autonomních obvodů, sledujeme odezvu (proudu) ve větvích nebo odezvu napětí v uzlech.

- Realizace filtru

#### 5.1.2 Návrh obecného autonomního obvodu

Při návrhu se postupuje sestavením obecného zapojení obr.5.1. Z něj pak je sestaven např. obvod pomocí dvou aktivních prvků a admitancí, pomocí kterých se propojí vybrané brány použitých aktivních prvků. Pro jiný počet aktivních prvků se může také sestavit autonomní obvod. To záleží na tom, jaký se vyžaduje řád filtru.



**Obr. 5.1** Obecné zapojení aktivních prvků do admitanční sítě

Z tohoto zapojení se pak může sestavit jakýkoliv obvod s různým počtem aktivních prvků, které budou mezi sebou propojeny admitanční sítí

Při návrhu filtru se dvěma aktivními prvky se projevuje snaha o co nejmenší počet admitančních prvků (4 až 5), které budou jedním vývodem uzemněny. Výběrem daných admitančních spojení se vytváří modifikace obvodu a jejich charakteristická rovnice.

### 5.1.3 Výpočet charakteristické rovnice $D(p)$

Tato matice je vytvořena pomocí operací sčítání s řádky a se sloupci. Po určení konečné matice se pomocí determinantu vypočte charakteristická rovnice  $D(p)$ . Využitím programu SNAP máme možnost přímo získat tvar CE v symbolickém vyjádření.

### 5.1.4 Volba jednotlivých prvků rovnice

Z obecného autonomního obvodu je vypočtena charakteristická rovnice  $D(p)$  s koeficienty, které jsou v ní obsaženy (v rovnici) spolu ze součiny součtu jednotlivých admitancí.

Pro dodržení podmínek kmitočtového filtru, že v charakteristické rovnici se musí vyskytovat všechny mocniny operátoru  $p$  a z důvodů stability filtru, musí být všechny členy rovnice stejné-kladné. Po zvolení daných koeficientů se nám daná charakteristická rovnice  $D(p)$  zjednoduší na potřebný tvar. Po této úpravě pak následuje samotné dosazení za jednotlivé admitance pasivními prvky jakoacitorů a rezistorů, tak abychom v charakteristické rovnici dostali všechny mocniné operátory  $p$  a . Díky zvolení daných pasivních a aktivních prvků se může sestavit el. obvod, který může být ještě sestaven z obecných proudových prvků.

### 5.1.5 Určení přenosových funkcí

Při určení přenosové funkce se využívá vlastnosti, že charakteristická rovnice se nemění, pokud do některé z větví [13] je vložen zdroj napětí, nebo mezi dva uzly obvodu vložen zdroj proudu.

Při určení přenosových funkcí se volí dva způsoby pro určení připojení zdroje do autonomního obvodu

- buzením zdrojem napětí, je vhodné připojit mezi pasivní dvojpól a zem,
- buzením zdrojem proudu, je vhodné připojit mezi uzel a zem .

Pro snímání signálové odezvy pak platí

- sledovaná napěťová odezva se snímá z napětí v uzlu vůči zemi,
- sledovaná proudová odezva se snímá z proudu tekoucí částí větve mezi dvojpólem a zemí.

Pomocí tohoto napěťového a proudového buzení do větví a uzlů a jejich odezev proudů a napětí z větví a uzlů tohoto autonomního obvodu se určí přenosové funkce, které jsou rozděleny podle jejich veličin na napěťový režim, proudový režim, nebo smíšený režim.

## 5.2 Metoda pomocí signálových toků

Tato metoda [21] se využívá při rychlé ruční analýze u jednodušších obvodů. Tyto signálové prvky se používají jak k návrhu obvodů, tak ke správné analýze jejich ověřování. Tento vývoj začal roku 1953 Masonem, který je vyžíval čistě pro návrh lineárních obvodů. Návrh se však nestačil realizovat, a proto se začala daná metoda zobecňovat – Coatesovy grafy. Tyto grafy signálových toků se využívají i v jiných oblastech jako jsou automatická řízení, datové komunikace, signálová technika. Grafy jsou složeny z uzlů a větví, jejich je konec je připojen k uzlu. Může se stát, že oba konce větve mohou být připojeny ke stejnému uzlu. Tyto grafy pak znázorňují vzájemné vztahy grafu mezi proměnnými. Proměnné jsou definovány uzly grafu větve definují jejich vzájemný vztah.

Pro syntézu a analýzu se používají Masonovy-Coatesovy grafy (M-C). Tato metoda se dá na základě pravidla M-C grafu využít pro přímý návrh obvodů s požadovaným tvarem přenosové funkce.

Přenosová funkce se dá vypočítat pomocí vztahu – Masonovo pravidlo:

$$K = \frac{Y}{X} = \frac{1}{\Delta} \sum_i P_i \Delta_i; \quad (5.1)$$

kde:

X je vstupní uzel,

Y je výstupní uzlu,

$\Delta$  je determinant grafu,

$P_i$  je přenos i-té cesty ze vstupního na výstupní uzel,

$\Delta_i$  je determinant části grafu, která se nedotýká i-té přímé cesty.

Determinant pak můžeme popsat vztahem:

$$\Delta = V - \sum_k S_1^{(k)} V_1^{(k)} + \sum_l S_2^{(l)} V_2^{(l)} - \sum_m S_3^{(m)} V_3^{(m)} + \dots, \quad (5.2)$$

kde :

$V$  je součin vlastních smyček ,

$S_1^{(k)}$  je přenos k- té smyčky,

$V_1^{(k)}$  je součin vlastních uzlů, kterých se k-tá smyčka nedotýká,

$S_2^{(l)}$  je součin přenosů dvou nedotýkajících se smyček ,

$V_2^{(l)}$  je součin všech vlastních smyček uzlů, kterých se l-tá smyčka nedotýká.

Pokud se smyčka nebo k-tá přímá cesta dotýká všech uzlů, pak součin  $V$  resp  $\Delta_k$  je identicky rovný jedné

Determinant M-C grafu představuje i levou část charakteristické rovnice CE jejíž tvar z části určuje chování analyzovaného obvodu. Při návrhu filtru n-tého řádu, pak se musí skládat aspoň z  $n+1$  členů, kde z důvodu stability musí být kladné. U návrhu je výhodné aby počet členů byl co nejmenší z důvodu snadné realizace.

Pro návrh filtru druhého řádu se definují podmínky [22] pro realizaci filtru:

- 1) V grafickém vyjádření existuje jedna smyčka , která je orientovaná, a dva napěťové uzly, kdy k jednomu či oběma jsou připojeny dva a více pasivních prvků,
- 2) V grafickém vyjádření existují smyčky, které jsou orientované a vzájemně se dotýkající a dva napěťové uzly, ke kterým je připojena admitance,
- 3) V grafickém vyjádření existují orientované smyčky, které se vzájemně dotýkají, a tři napěťové uzly, ke kterým je připojena jedna admitance,
- 4) V grafickém vyjádření existuje jeden vysokoimpedanční uzel a tři vzájemně se dotýkající orientované smyčky, které tímto uzlem procházejí.

Při návrhu filtru vycházíme z charakteristických rovnic, které jsou složeny ze členů, kterými při změnách můžeme měnit jak jakost  $Q$ , tak mezní kmitočet  $f_0$ .

Charakteristická rovnice měnící činitel jakosti nezávislé na mezním kmitočtu při změně vodivosti  $G_3$  je:

$$CE = p^2 C_1 C_2 + p C_1 G_3 + G_1 G_2 = 0. \quad (5.3)$$

Pro sestavení dalších charakteristických rovnic daného filtru využijeme podmínky z 3. a 4. definice.

Charakteristická rovnice měnící činitel jakosti nezávislé na mezním kmitočtu při změně vodivosti  $G_3$ :

$$CE = p^2 C_1 C_2 G_3 + p C_1 G_1 G_2 + G_1 G_2 G_3 = 0 \quad (5.4)$$

Charakteristická rovnice měnící činitel jakosti a mezní kmitočet nezávislé na sobě, kde jakost filtru  $Q$  lze měnit pomocí vodivosti  $G_1$  a mezní kmitočet se mění se současnou změnou hodnot vodivosti  $G_2$  a  $G_3$ , přitom platí  $G_2 = G_3$ . Má tvar:

$$CE = p^2 C_1 C_2 G_5 + p C_1 G_1 G_2 + G_2 G_3 G_4 = 0. \quad (5.5)$$

Z předchozí rovnice vyplývá následující rovnice umožňující také změnu jakosti a mezního kmitočtu:

$$CE = p^2 C_1 C_2 G_4 + p C_1 G_1 G_2 + G_2 G_3 G_4 = 0 \quad (5.6)$$

kde  $Q$  je možné řídit pomocí  $G_1$  nebo  $G_4$

Změnu parametru – jakosti  $Q$ , a mezního kmitočtu  $f_0$ , můžeme realizovat i pomocí aktivních prvků.

Jakosti  $Q$  můžeme měnit pomocí proudového přenosu  $n_1$

$$CE = p^2 C_1 C_2 + n_1 p C_1 G_1 + G_1 G_2 = 0. \quad (5.7)$$

Nezávislou změnu jakosti a a charakteristického kmitočtu lze měnit i pomocí rovnic znázorňující tvar:

$$CE = p^2 C_1 C_2 + n_1 n_2 p C_1 G_1 + n_2 n_3 G_1 G_2 = 0, \quad (5.8)$$

kde

-  $n_1$  mění činitel jakosti,

-  $n_2, n_3$  mění kmitočet při splnění podmínky  $n_2 = n_3$ .

Další možnou rovnicí, která je nepraktičtější pro nezávislou změnu jakosti a mezního kmitočtu je:

$$CE = p^2 C_1 C_2 + n_1 p C_1 G_1 + n_1 n_2 G_1 G_2 = 0. \quad (5.9)$$

Přitom musí platit  $n_1 = n_2$ .

## 5.3 Další metody pro návrh filtrů

Pro návrh kmitočtových filtrů lze použít i další metody, kterými jsou však spíše intuitivní, nebo využívají již známá obvodová řešení.

### 5.3.1 Metoda využívající syntetické prvky

Při této ní se využívá syntetických prvků s užitím dvou transformačních článků, imitačního invertoru a imitačního konvertoru, které patří mezi lineární dvojbrany využívající kaskádní rovnice. Při této metodě se používá (v návrhu) autonomních obvodů. Jmenované prvky lze kromě metody transformačních článků realizovat i pomocí bloků, kde se příslušné imitační funkce vyskytují na jejich vstupních branách.

### 5.3.2 Metoda využívající imitaci vyšších řádů

Tato metoda (imitací vyšších řádů) se využívá při návrhu pomocí běžných aktivních prvků tab.5-1. Využívá tedy vlastnosti admitančních a impedančních vlastností [15] syntetických prvků vytvářených pomocí transformačních bloků. Aby se docílilo vytvoření imitačních prvků vyššího řádu, zapojují se kaskádně transformační bloky, které mohou být paralelní nebo sériové.

*Tab. 5-1 Vlastností imitančních dvojpólů*

Imitance	řád	typ
$Z(j\omega)=R$	0	E
$Y(j\omega)=G$	0	D
$Z(j\omega)=j\omega$	1	E
$Y(j\omega)=j\omega C$	1	D
$Z(j\omega)=-\omega^2 E$	2	E
$Y(j\omega)=-\omega^2 D$	2	D
$Z(j\omega)=(j\omega)^N E$	N	E
$Y(j\omega)=(j\omega)^N D$	N	D



### 5.3.3 Metoda transformace příčkových článků RLC

Metoda transformace příčkových článků RLC využívá Brutonovu transformaci (tab. 5-2), kde napěťový přenos je dán poměrem impedancí prvků. Ten je dělen komplexním kmitočtem  $p$  a násobena koeficientem  $kt$ . Dané obvody je pak výhodné realizovat pomocí využití RLC. K vytvoření modelů se využívají transformační články konvertoru nebo investorů nebo obvody využívající vlastnosti syntetických prvků. U této metody můžeme využít několik transformací:

- simulací dvojných kapacitorů (přímá, bloková),
- simulace dvojných induktorů (přímá, bloková),

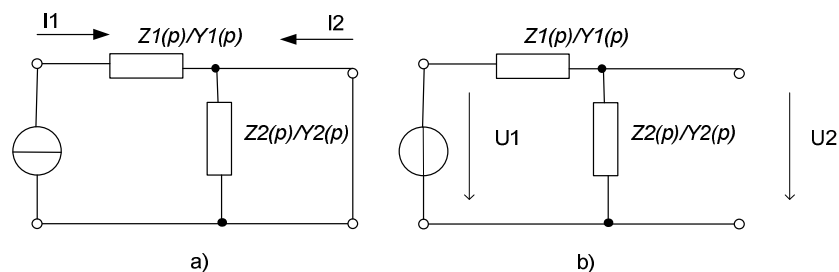
která znázorňuje 
$$Z_T = \frac{k_T}{p} Z . \quad (5.13)$$

Tab. 5-2 Transformace RLC prvků

Impedance $Z$	transformovaná impedance $Z_T$	transformace
$R$	$C$	$C_R = 1/k_T R$
$L$	$R$	$R_L = k_T L$
$C$	$D$	$D_C = C/k_T$

### 5.3.4 Metoda pomocí frekvenčně závislých děličů

Metoda pomocí frekvenčně závislých děličů obr 5.2 využívá impedanční nebo admitanční děliče a jejich vlastnosti. Jejich přenos se rozděluje podle toho, v jakém pracují režimu: proudovém režimu nebo napěťovém. Patří k syntetickým prvkům, kdy  $Z1$  nebo  $Z2$  jsou vhodné typy syntetických prvků vyšších řádů.



Obr. 5.2 Zapojení impedančního/ admitančního děliče v a) proudovém režimu b) napěťovém režimu

Pro tyto obvody pak můžeme určit přenos pro jednotlivé obvody.

$$Ki(p) = \frac{I_2}{I_1} = -\frac{Z_1(p)}{Z_1(p) + Z_2(p)}, \quad (5.14) \quad Ku(p) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_2(p)}{Z_1(p) + Z_2(p)}, \quad (5.15)$$

$$Ki(p) = \frac{I_2}{I_1} = -\frac{Y_2(p)}{Y_1(p) + Y_2(p)}, \quad (5.16) \quad Ku(p) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Y_1(p)}{Y_1(p) + Y_2(p)}. \quad (5.17)$$

Pro filtry N-tého řádu volíme dvojpóly vykazující funkci N-tého řádu.

### 5.3.5 Metoda využívající integrátorové bloky

Tato metoda s integrátorovými bloky využívá prvek integrátor s převodem  $1/p$ , pomocí kaskádního zapojení se zpětnými vazbami.

### 5.3.6 Metoda stavové proměnné

U metody stavových proměnných se pracuje pomocí kaskádního zapojení neinvertujícího a pro proudové konvejory i invertujícího zapojení integrátorů. Jeho princip spočívá v zavedení zpětné vazby z výstupu integrátoru zpět na vstup pomocí váhového koeficientu, kde se tyto zpětné vazby sčítají sčítačkou.

### 5.3.7 Metoda LEAP-FROG

Pracuje na principu vlastností integrovaných článků zapojených do kaskády se zpětnými vazbami. Tato metoda má však jiné převedení zpětných vazeb. Zde je přivedena zpětná vazba z jednoho bloku zpět na vstup předchozího bloku. Využívající RLC příčkové články.

## 6 Návrhy filtrů

Při návrhu budeme používat aktivní prvky typu: proudový sledovač CF (Current Follower), vícevýstupový proudový sledovač MO-CF (Multiple Output Current Follower), digitálně řízený proudový sledovač DCCA (Digitally Controlled Current Amplifier) a proudový konvektor CC (Current Conveyor). S proudovými konvektory a proudovými sledovači se budou vytvářet jednoduché filtry a s pomocí digitálně řízených proudových sledovačů se bude u těchto filtrů řídit jejich jakost a mezní kmitočty.

Pro realizaci filtrů budeme používat metody autonomních obvodů. U signálových toků je výhoda v přímé realizaci konkrétní charakteristické rovnice, kterou potřebujeme. U složitějších rovnic je pak její realizace složitější. U metody autonomních obvodů je výhoda ve velkém množství jednotlivých zapojení, které jsou vytvořena pomocí celé admitanční sítě. Pak při začleňování digitálně řízeného proudového sledovače stačí vkládat prvek vhodně do zpětné vazby.

### 6.1 Volba hodnot součástek

Hodnoty součástek se volí podle mezního kmitočtu, jakosti a řádu filtru. U odvození se vyjde z přenosových funkcí (charakteristické rovnice), které byly vypočteny za pomoci programu SNAP. Z těchto hodnot a koeficientů určující řád filtru a aproximace se vyjádří hodnota pasivních součástek.

Obecné vyjádření přenosových funkcí druhého řádu:

$$K = \frac{K_{o1}}{s^2 b_{21} + s a_{21} + 1} = \frac{K_{o2}}{p^2 + p \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}, \quad (6.1)$$

kde

$a_{21}, b_{21}$  jsou koeficienty určující řád a druh aproximace,

$\omega_0$  úhlová frekvence,

$Q$  jakost filtru.

Pro převod mezi přenosovými funkcemi:

$$s = \frac{p}{\omega_0} . \quad (6.2)$$

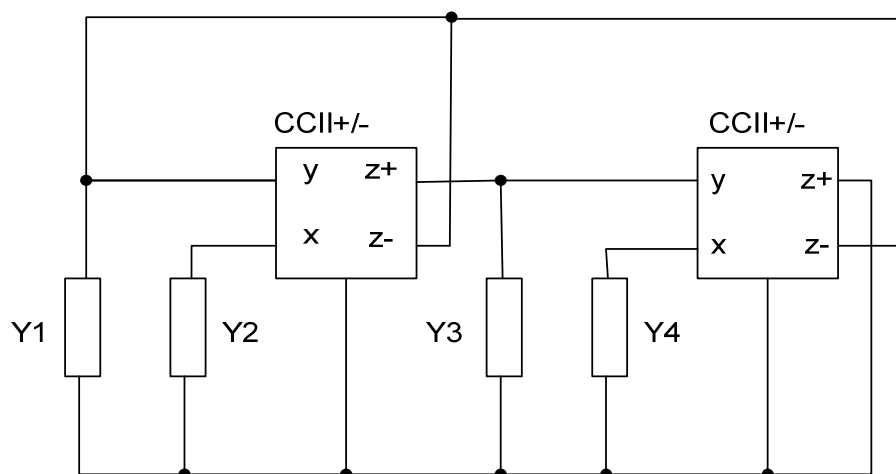
Po požadování mezního kmitočtu  $f_0$  je vhodné hodnotu kapacitoru volit podle vztahu:

$$C \approx \frac{3 \cdot 10^{-7}}{\sqrt{f_0}} , \quad (6.3)$$

kde  $f_0$  je mezní kmitočet .

## 6.2 Filtér s aktivním prvkem DCCA pro řízení jakosti a mezního kmitočtu

N a obr. 6.1 je uveden autonomní obvod , který byl již dříve popsán [24] . Tento obvod je výchozím pro návrh viditelného filtru, kdy do jeho větví jsou vhodně vloženy aktivní prvky DCCA. Tento obvod je výchoz pro návrh viditelného filtru, kdy do jeho větví jsou vhodně vloženy aktivní prvky DCCA.



Obr. 6.1 Zapojení autonomního obvodu s dvěma CCII+/-

Charakteristická rovnice daného obvodu:

$$CE = Y_4 Y_2 + Y_3 Y_2 + Y_1 Y_3 = 0 . \quad (6.4)$$

S dosazením konkrétních pasivních prvků se tvar upraví:

$$Y_1 = C_1$$

$$Y_2 = G_1$$

$$Y_3 = C_2$$

$$Y_4 = G_2$$

$$CE = G_2 G_1 + p C_2 G_1 + p^2 C_1 C_2 = 0. \quad (6.5)$$

### 6.2.1 Návrh filtru pro změnu jakosti

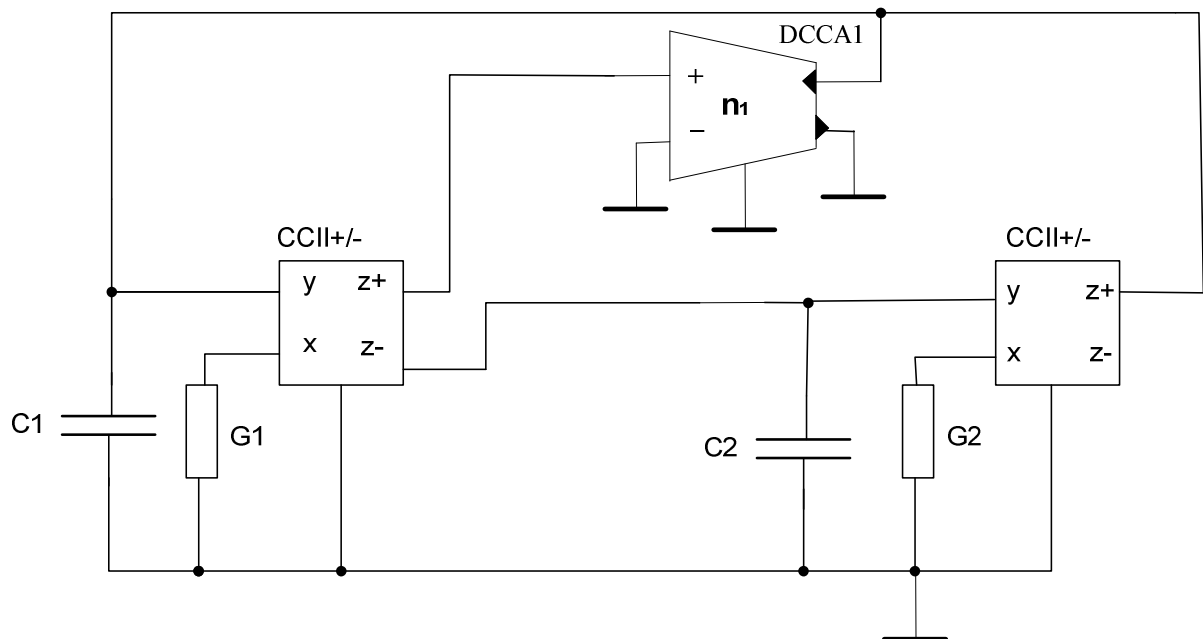
U tohoto filtru vycházíme z předchozího zapojení obr 6.1, kde charakteristickou rovnicí:

$$CE = Y_4 Y_2 + Y_3 Y_2 + Y_1 Y_3 = 0 \quad (6.6)$$

Zapojením prvku DCCA za pozitivní proudový výstup CCII+/- se původní charakteristická rovnice upraví do tvaru:

$$CE = p^2 C_1 C_2 + n_1 p C_1 G_1 + G_1 G_2 = 0 \quad (6.7)$$

Jakosti  $Q$  můžeme měnit pomocí proudového přenosu  $n_1$ , což je docíleno DCCA1 u obrázku (obr 6.2) a DCCA2 a DCCA3 má proudový přenos  $n_{2,3} = 1$ .



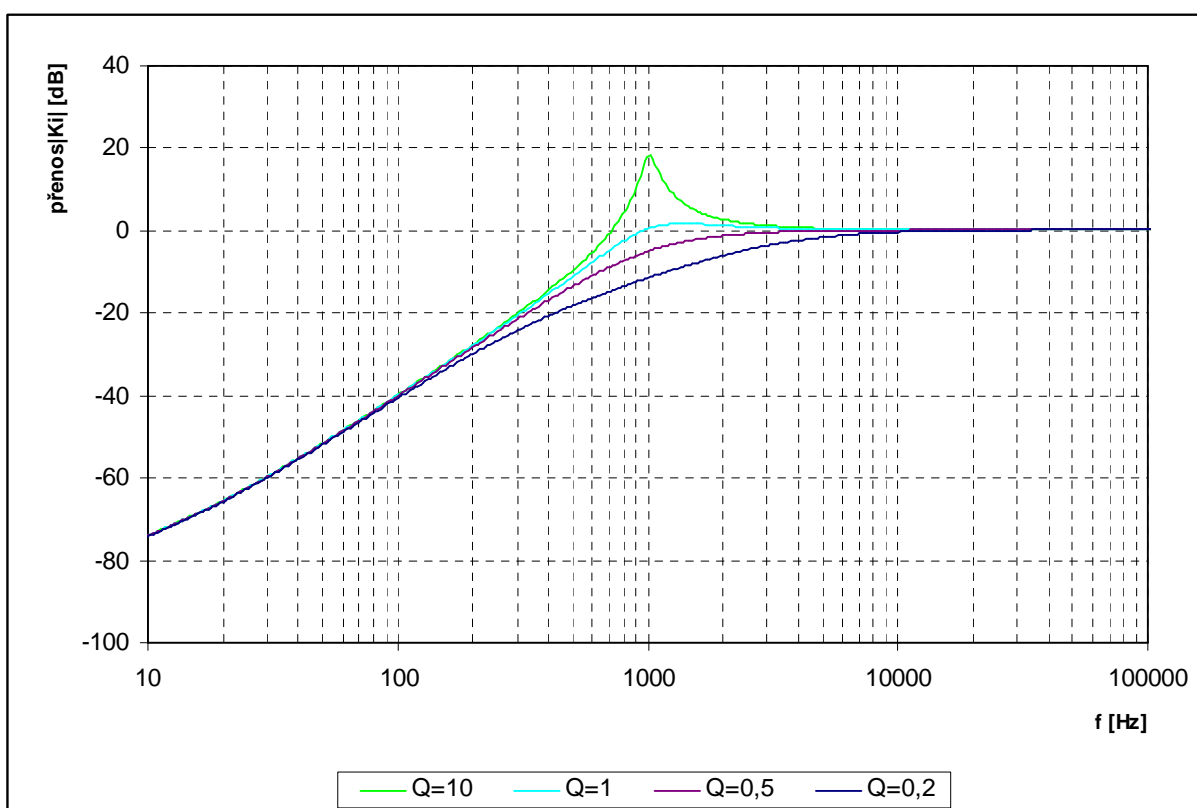
**Obr. 6.2** Zapojení obvodu s dvěma CCII+/- a jedním DCCA

Jakost měníme pomocí:

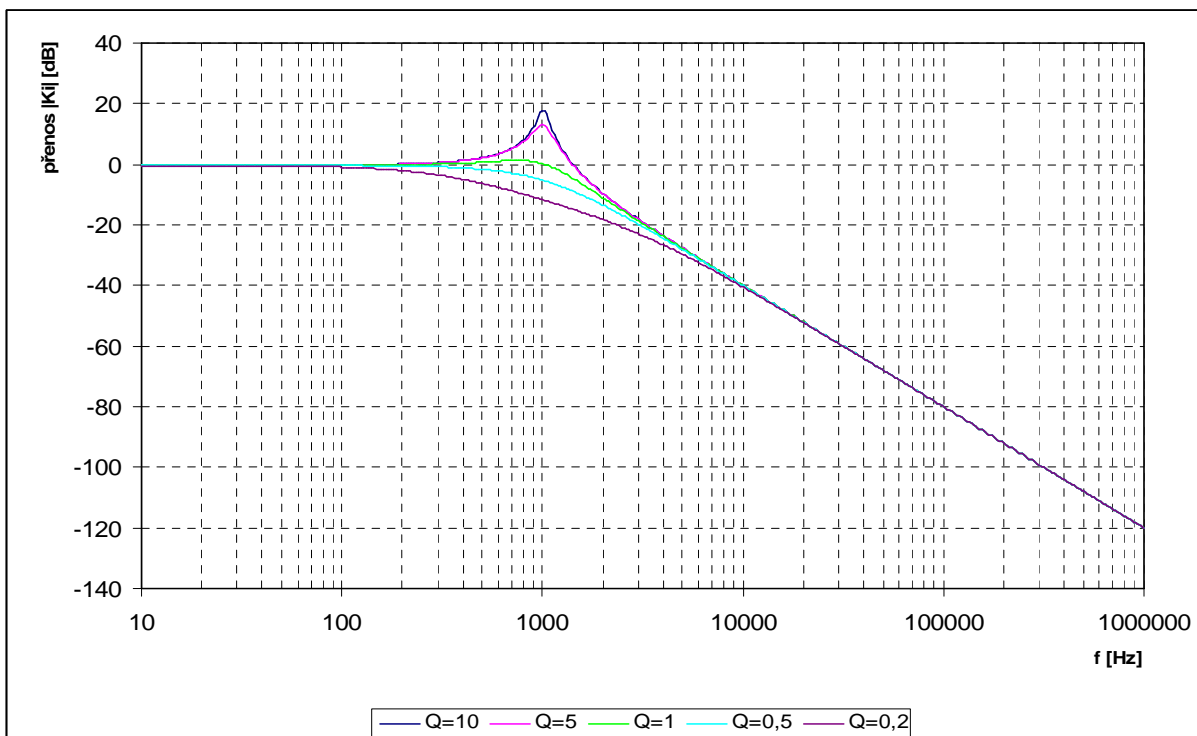
$$Q = \frac{1}{n_1} \sqrt{\frac{G_2 C_1}{G_1 C_2}} = \frac{1}{n_1} \sqrt{\frac{C_1 R_1}{R_2 C_2}} \quad (6.8)$$

### 6.2.1.1 Charakteristiky navrhovaného filtru

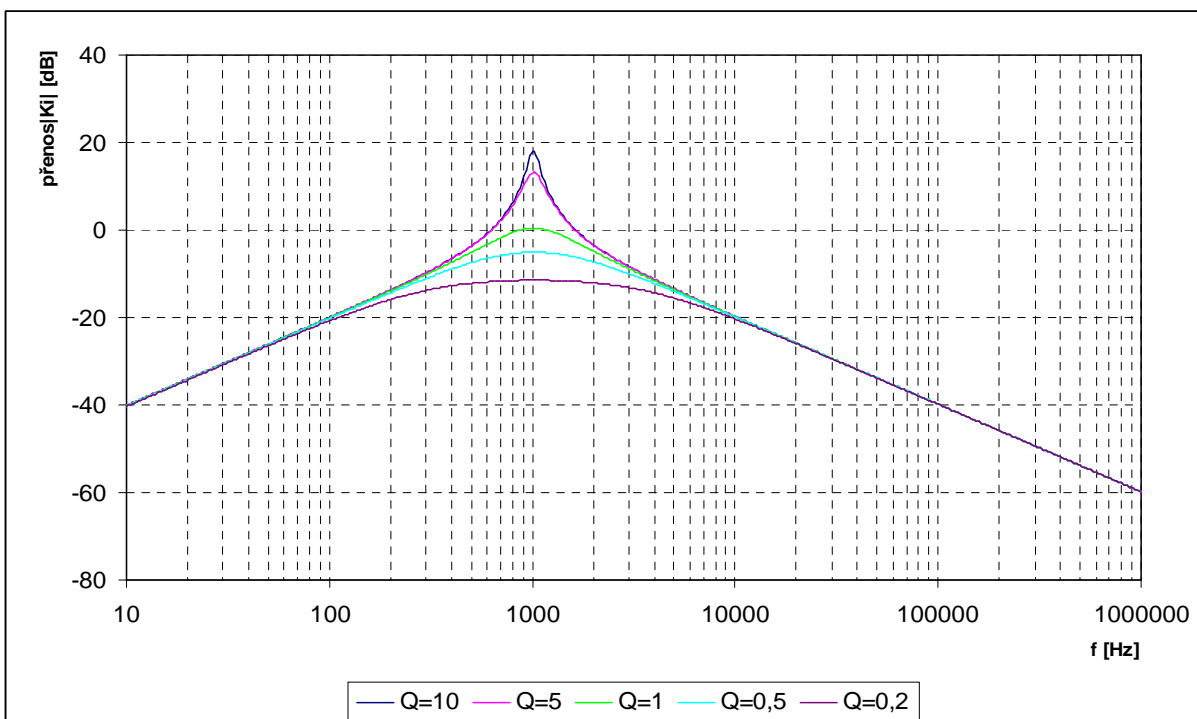
Na obr.6.3 až obr.6.5 jsou znázorněny přenosové charakteristiky navrhovaného filtru umožňující řídit jakost  $Q$  při konstantním mezním kmitočtu  $f_0=970\text{Hz}$ .



**Obr.6.3** Přenosové charakteristika horní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočet  $f=970\text{Hz}$  pro různé jakosti.



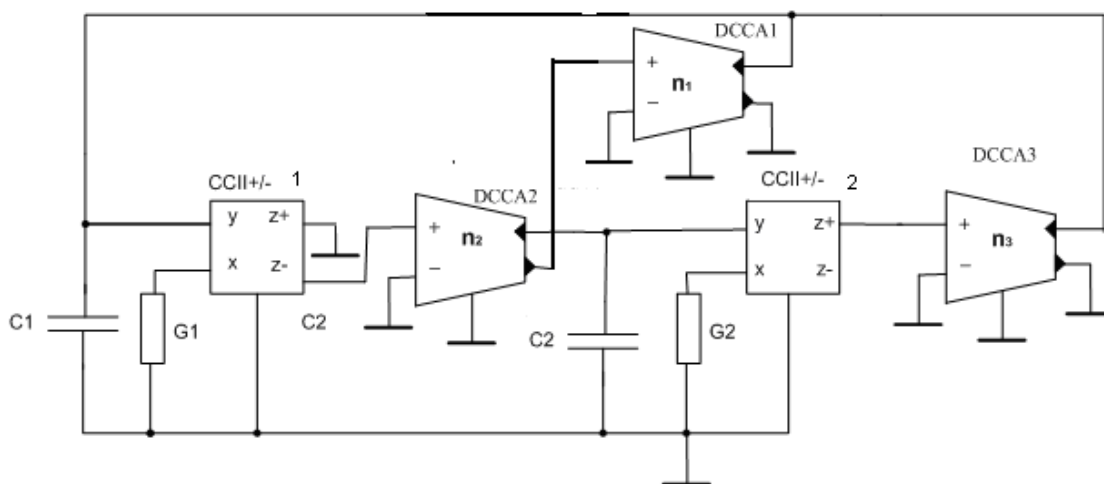
**Obr.6.4** Přenosové charakteristika dolní propusti pracující v proudovém módu navrhovaný pro mezní kmitočet  $f=970\text{Hz}$  pro různé jakosti.



**Obr.6.5** Přenosové charakteristika pásmové propusti pracující v proudovém módu navrhovaného pro mezní kmitočet  $f=970\text{Hz}$  pro různé jakosti.

### 6.2.2 Návrh filtru pro nezávislou změnu jakosti a mezního kmitočtu

Po dosazení do obvodu obr. 6.1 konkrétních pasivních prvků a přidání do zpětných vazeb aktivních proudových prvků DCCA vzniká obvod obr 6.2.



**Obr. 6.6** Zapojení autonomního obvodu s dvěma CCII+/- a třemi DCCA

Obecná charakteristická rovnice daného obvodu:

$$CE = n_2 n_3 Y_4 Y_2 + n_1 n_2 Y_3 Y_2 + Y_1 Y_3 = 0 \quad (6.9)$$

Charakteristická rovnice pro vyjádření pasivních prvků:

$$CE = n_2 n_3 G_2 G_1 + n_1 n_2 p C_2 G_1 + p^2 C_1 C_2 = 0 \quad (6.10)$$

Z dané rovnice (6.4) pak vidíme tvar rovnice (5.9) umožňující díky koeficientům  $n$  (proudových přenosů) měnit činitel jakosti a mezní kmitočet nezávisle na sobě.

Činitel jakosti  $Q$  se mění proudovým přenosem  $n_1$  a charakteristický kmitočet  $f_0$  lze současně měnit přenosem  $n_2$  a  $n_3$ , musí platit  $n_2 = n_3$ .



Tímto zapojením lze realizovat filtry: dolní, horní, pásmovou propust, fázovací článek a pásmovou zadrž díky jeho vstupním proudům a jeho proudovým výstupům ve správném vložení podle kap.3.3.2.

#### 6.2.2.1 Vzorce pro výpočet hodnot pasivních součástek, jakosti a mezního kmitočtu

Výpočet úhlové frekvence a jakosti filtru.

Pro výpočet se využilo charakteristické rovnice:

$$CE = p^2 C_1 C_2 + p C_2 G_1 n_1 n_2 + G_1 G_2 n_2 n_3 = p^2 + \frac{p G_1 n_1 n_2}{C_1} + \frac{G_1 G_2 n_2 n_3}{C_1 C_2}, \quad (6.11)$$

pak z vyjádření vzorců je patrné

$$\omega_0^2 = \frac{G_1 G_2 n_2 n_3}{C_1 C_2}, \quad (6.12)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{G_1 G_2 n_2 n_3}{C_1 C_2}} = \sqrt{\frac{n_2 n_3}{C_1 C_2 R_1 R_2}}, \quad (6.13)$$

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{G_1 n_1 n_2}{C_1}, \quad (6.14)$$

$$Q = \frac{\omega_0 C_1}{G_1 n_1 n_2}, \quad (6.15)$$

po dosazení z předchozího výsledku

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{G_1 G_2 n_2 n_3}{C_1 C_2}} C_1}{G_1 n_1 n_2}, \quad (6.16)$$

$$Q = \frac{1}{n_1} \sqrt{\frac{G_2 C_1 n_3}{G_1 C_2 n_2}} = \frac{1}{n_1} \sqrt{\frac{C_1 R_1 n_3}{R_2 C_2 n_2}}. \quad (6.17)$$

Pokud kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  zvolíme podle přibližné hodnoty, která odpovídá vzorci vztahující se ke kmitočtu, můžeme vypočítat jednotlivé hodnoty odporů.

#### 6.2.2.2 Hodnoty pasivních součástek pro daný filtr

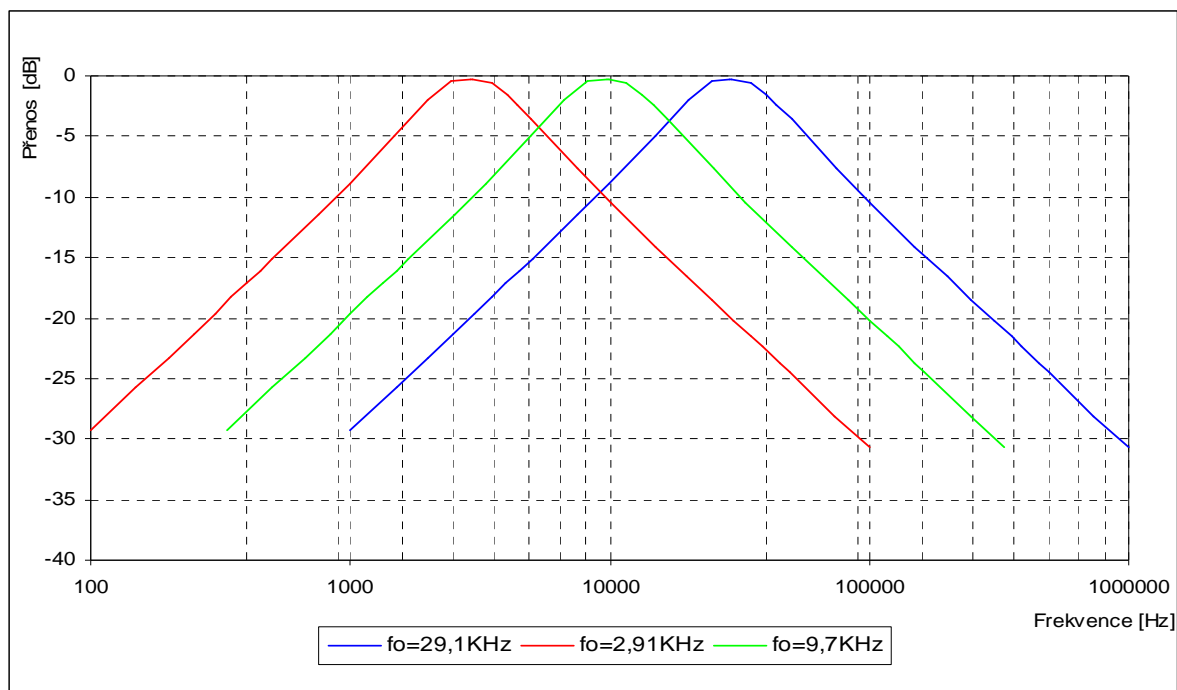
Pro výpočet kapacity řadových hodnot kondenzátoru použijeme vzorec (6.3) s využitím frekvence a podmínky  $C_1=C_2$ . Z podmínek  $R_1=R_2$  a  $n_2=n_3$  vypočteme hodnoty odporů za pomoci vzorce (6.10). Proudové přenosy  $n_2, n_3$  volíme tak, aby umožnily rovnoměrné měnit daný rozsah změny mezního kmitočtu v dané kmitočtové oblasti. Z důvodů předchozích podmínek a výpočtu jednotlivých hodnot můžeme měnit jakost filtru za pomoci vzorce (6.13) při změně proudového přenosu  $n_1$ . Vypočtené hodnoty znázorňuje tab. 6-1.

*Tab. 6-1 Tabulka vypočtených hodnot pasivních prvků*

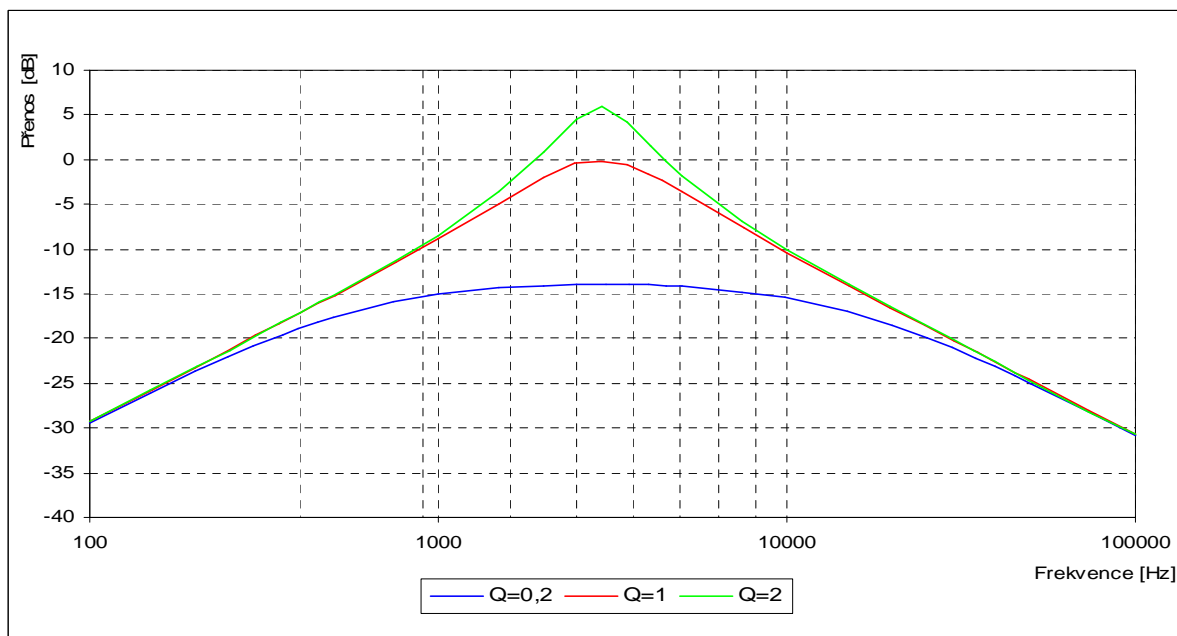
Kmitočtové rozmezí [Hz]	C1,2[F]	R1,2[Ω]
3k-30k	1,8n	91k
300k-3M	0,18n	9,1k

### 6.2.2.3 Charakteristiky navrhovaného filtru

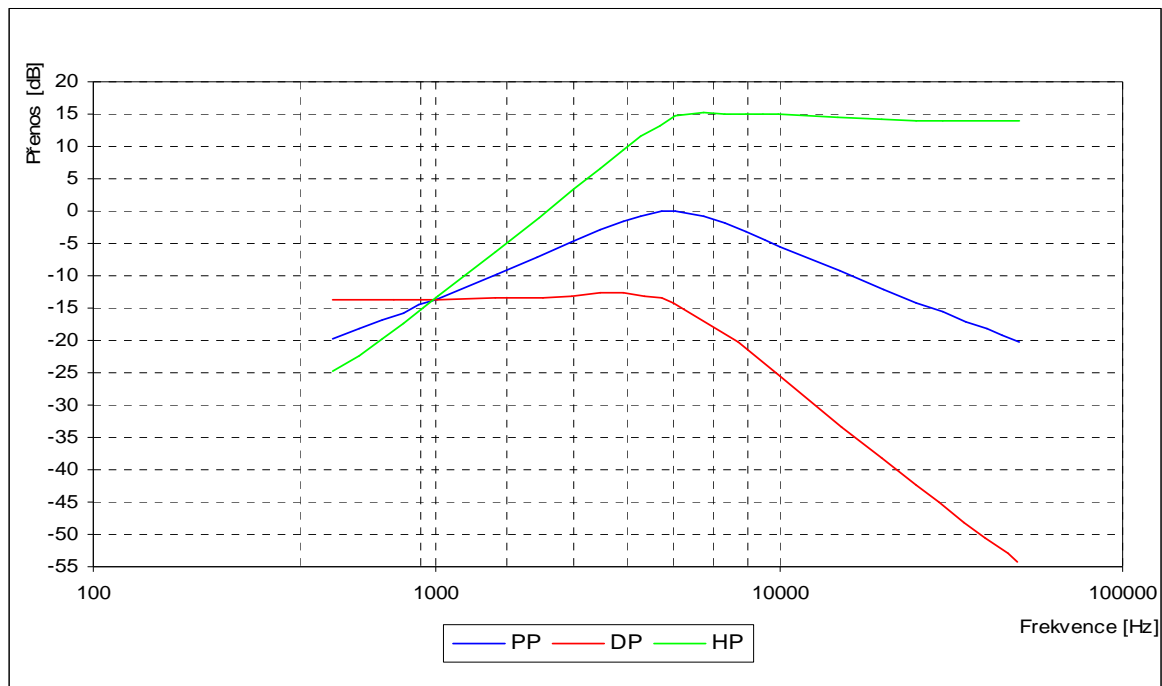
Na obr.6.7 až obr.6.9 jsou znázorněny přenosové charakteristiky navrhovaného filtru umožňující řídit jakost  $Q$  a mezním kmitočtu  $f_0$ .



**Obr.6.7** Přenosové charakteristiky filtru pro pásmovou propust pracující v proudovém módu navrhovaném pro jakost  $Q = 1$  pro různé kmitočty.



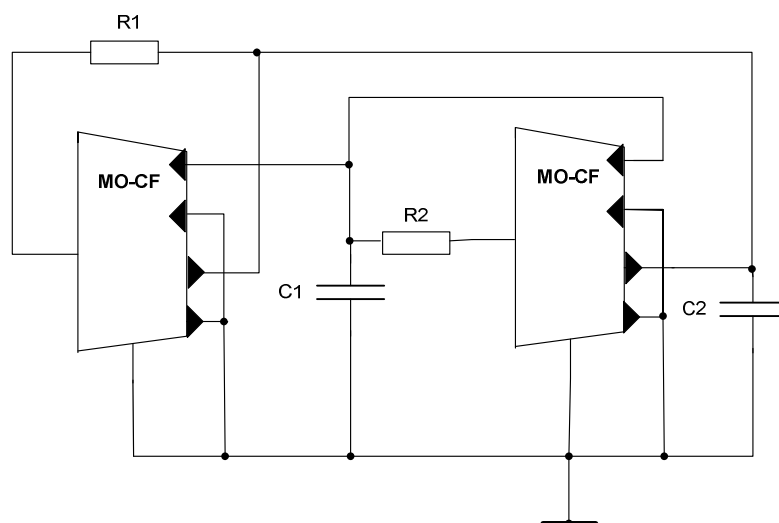
**Obr.6.8** Přenosové charakteristiky filtru pro pásmovou propust pracující v proudovém módu navrhovaném pro mezní kmitočet  $f = 2,9 \text{ KHz}$  pro různé jakosti.



**Obr.6.9** Přenosové charakteristika různých filtrů pracujících v proudovém módu navrhovaném pro mezní kmitočet  $f=4,86\text{KHz}$  a jakost  $Q=1$ .

### 6.3 Filtr s využitím aktivního prvku MO-CF

Tento obvod obr.6.10 znázorňuje obecný filtr určující možná zapojení s využitím součástek MO-CF. S využitím těchto prvků lze vytvořit i řízený filtr správným vložením DCCA do cesty mezi prvky filtru.



**Obr. 6.10** Elektrické schéma obvodu s dvěma MO-CF

Obecná charakteristická rovnice:

$$CE = Y_4 Y_2 + 2Y_3 Y_2 + Y_1 Y_3 = 0 \quad (6.18)$$

Při zvolení pasivních prvků má charakterická rovnice tvar:

$$CE = p^2 C_1 C_2 + 2p C_2 G_2 + G_1 G_2 = 0 \quad (6.19)$$

Po úpravě

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}} = \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (6.20)$$

$$Q = \frac{\omega_0 C_1}{2G_2}, \quad (6.21)$$

po dosazení z předchozího výsledku

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_2 C_1}{C_2 R_1}}, \quad (6.22)$$

Pro zvolený typ aproximace a hodnoty kapacitorů se hodnoty rezistorů určí dle vztahu:

$$CE = \frac{p^2 C_1 C_2}{G_1 G_2} + \frac{2p C_2 G_2}{G_1 G_2} + 1 = 0, \quad (6.23)$$

kde po dosazení

$$p = s\omega_0$$

$$R_1 = \frac{a_{21}}{2\omega_0 C_2}, \quad (6.24)$$

$$R_2 = \frac{2b_{21}}{a_{21}\omega_0 C_1} \quad (6.25)$$

### 6.3.1 Hodnoty pasivních součástek pro daný filtr

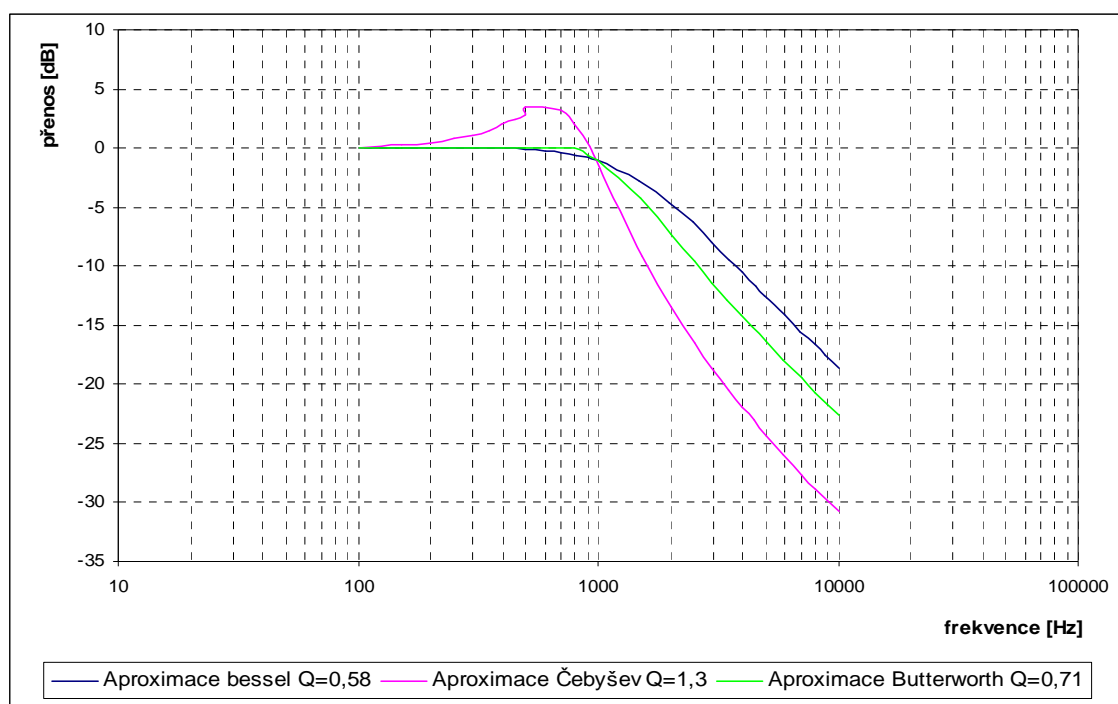
Hodnoty součástek pro zvolené aproximace jsou uvedeny tab.6-2.

Tab. 6-2 Tabulka vypočtených hodnot pro filtr s MO-CF

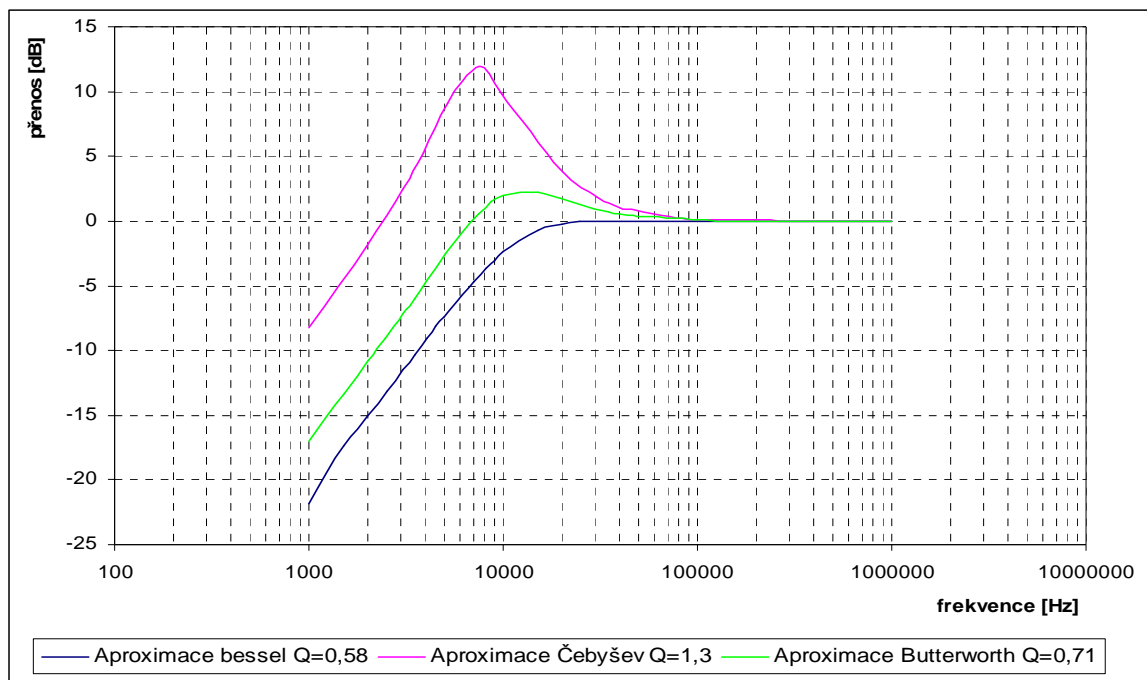
Mezní kmitočet [Hz]	C <sub>1,2</sub> [F]	Aproximace								
		Bessel			Čebyšev *			Butterwort		
		R <sub>1</sub> [Ω]	R <sub>2</sub> [Ω]	Q [-]	R <sub>1</sub> [Ω]	R <sub>2</sub> [Ω]	Q [-]	R <sub>1</sub> [Ω]	R <sub>2</sub> [Ω]	Q [-]
1K	9,1n	11K	15K	0,58	9,1K	62K	1,30	12K	24K	0,71
10K	3n	3,6K	4,7K		2,7K	20K		3,6K	7,5K	
1M	300p	360	470		270	2K		360	750	
Poznámka	* Se zvlněním 3dB									

### 6.3.2 Charakteristiky navrhovaného filtru

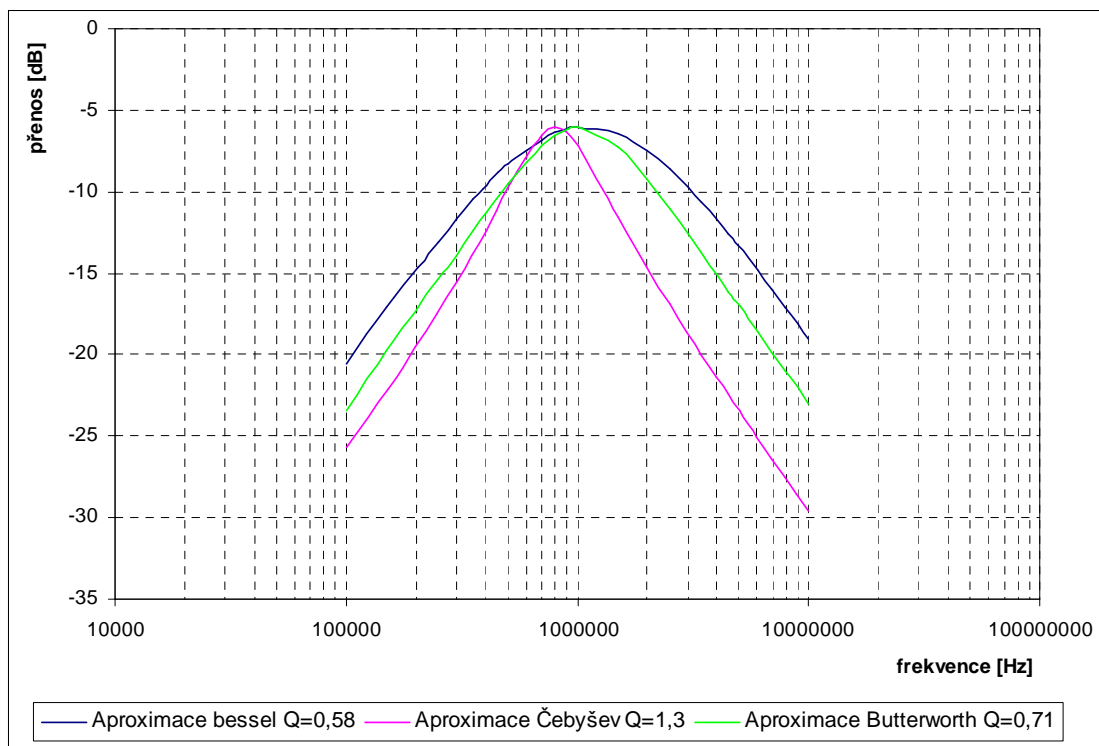
Na obr. 6.11 až obr.6.13 jsou uvedeny výsledky simulací analyzovaného kmitočtového filtru



Obr.6.11 Přenosové charakteristiky dolní propusti pracující v proudovém módu navrhovaném pro mezní kmitočet  $f=1\text{KHz}$  při různých aproximacích.



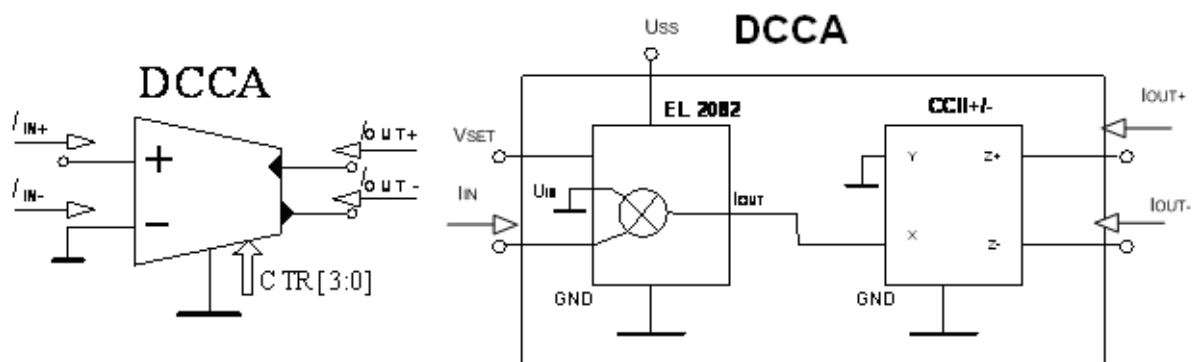
**Obr.6.12** Přenosové charakteristiky horní propusti pracující v proudovém módu navrhovaném pro mezní kmitočet  $f=10\text{kHz}$  při různých aproximacích.



**Obr.6.13** Přenosové charakteristiky pásmové propusti pracující v proudovém módu navrhovaný pro mezní kmitočet  $f=1\text{MHz}$  při různých aproximacích.

## 7 Praktické ověření navrhovaných filtrů

Protože prvek DCCA není v současné době fyzicky dostupný, lze jej do jisté míry nahradit spojením proudové násobičky EL 2082 a proudového konveju CCII+/- (obr.7.1). tato slučitelnost není nijak omezující, neboť struktury popsané v kap.6 využívají jen jeden z proudových vstupů prvku DCCA.



*Obr. 7.1 Schématická značka DCCA / Nahrazení struktury DCCA pomocí konveju a EL 2082*

### EL 2082

Chování EL 2082 lze popsat těmito základními parametry:

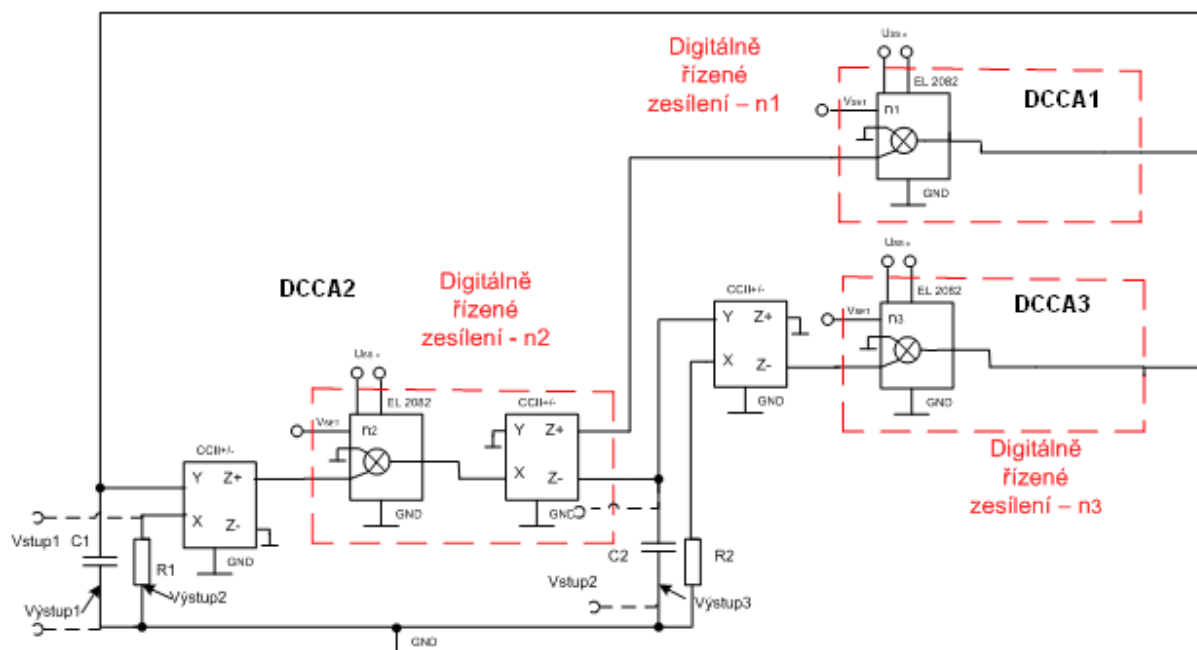
$U_{SS}$  - napájecí symetrické napětí ( $U_{SSmax} = \pm 7V$ )

$V_{SET}$  - řídicí napětí určující zesílení A ( $0 < V_{SETmax} < U_{SSmax}$ )

$I_{OUT}$  - výstupní proud daný zesílením A a vstupním proudem  $I_{IN}$

$$I_{OUT} = V_{SET} * I_{IN}$$





**Obr. 7.1** Elektrické schéma řízeného filtru s využitím EL 2082

K realizaci bylo vybíráno multifunkční zapojení z obr.6.2. Na obr.7.2 je uvedeno konečné obvodové řešení. Protože v případě DCCA1 a DCCA3 proudové konvejory pracují pouze jako jednoduché proudové sledovače, nebylo nutné je pro náhradu DCCA použít.

Obecná charakteristická rovnice:

$$CE = Y_4 Y_2 n_1 n_3 + Y_3 Y_2 n_1 n_2 + Y_1 Y_3 = 0 \quad (7.1)$$

Při zvolení pasivních prvků má charakteristická rovnice tvar:

$$CE = G_1 G_2 n_2 n_3 + p C_2 G_1 n_1 n_2 + p^2 C_1 C_2 = 0 \quad (7.2)$$

Z rovnice (5.8) vyplývají vztahy:

$n_1$  mění činitel jakosti

$n_2, n_3$  mění kmitočet při splnění podmínky  $n_2 = n_3$

## 7.1 Přenosové funkce daného obvodu závislosti na vstupu a výstupu

*Tab. 7-1 Tabulka určující typ filtru v závislosti na jednotlivých vstupech/výstupech*

Typ filtru	Vstup/Výstup	Přenosová funkce	
Horní propust	$R_1/C_2$	$\frac{p^2 R_1 R_2 n_2 C_1 C_2}{n_2 n_3 + p R_2 C_2 n_1 n_2 + p^2 R_1 R_2 C_1 C_2}$	(7.3)
Dolní propust	$C_2/R_1$	$\frac{n_3}{n_2 n_3 + p R_2 C_2 n_1 n_2 + p^2 R_1 R_2 C_1 C_2}$	(7.4)
Pásmová propust	$C_2/C_1$	$\frac{p R_1 C_1 n_3}{n_2 n_3 + p R_2 C_2 n_1 n_2 + p^2 R_1 R_2 C_1 C_2}$	(7.5)

Z dané charakteristické rovnice vyplývá:

$$\omega_0^2 = \frac{G_1 G_2 n_2 n_3}{C_1 C_2}, \quad (7.6)$$

$$f_0 = \frac{n_2}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}, \quad (7.7)$$

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{G_1 n_1 n_2}{C_1}, \quad (7.8)$$

$$Q = \frac{1}{n_1}. \quad (7.9)$$

Po zvolení hodnot pasivních součástek:

$R_1=9,1\text{k}\Omega$ ,

$R_2=9,1\text{ k}\Omega$ ,

$C_1=18\text{nF}$ ,

$C_2=18\text{nF}$ ,

zvolení podmínek  $n_2=n_3$  (mění mezní kmitočet,  
 $n_1$ (mění jakost filtru).

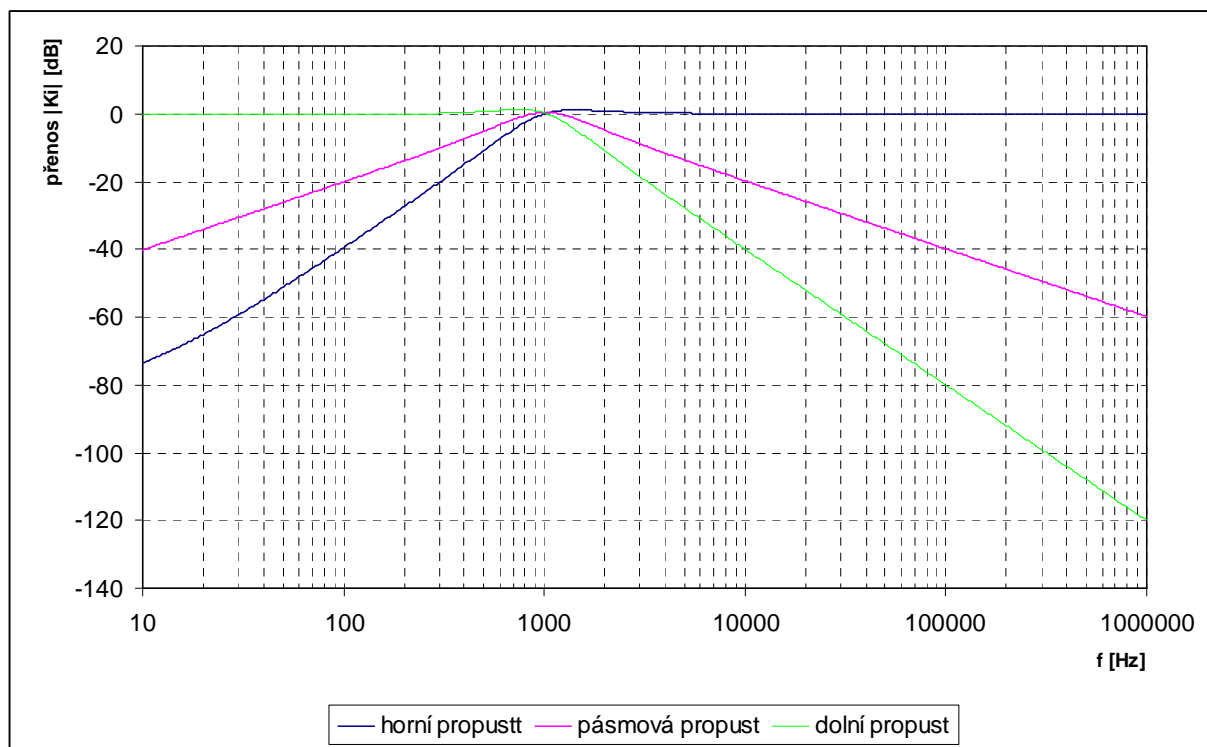
Přibližná hodnota mezního kmitočtu:

$$f_0 \approx n_2 * 971,64. \quad (7.10)$$

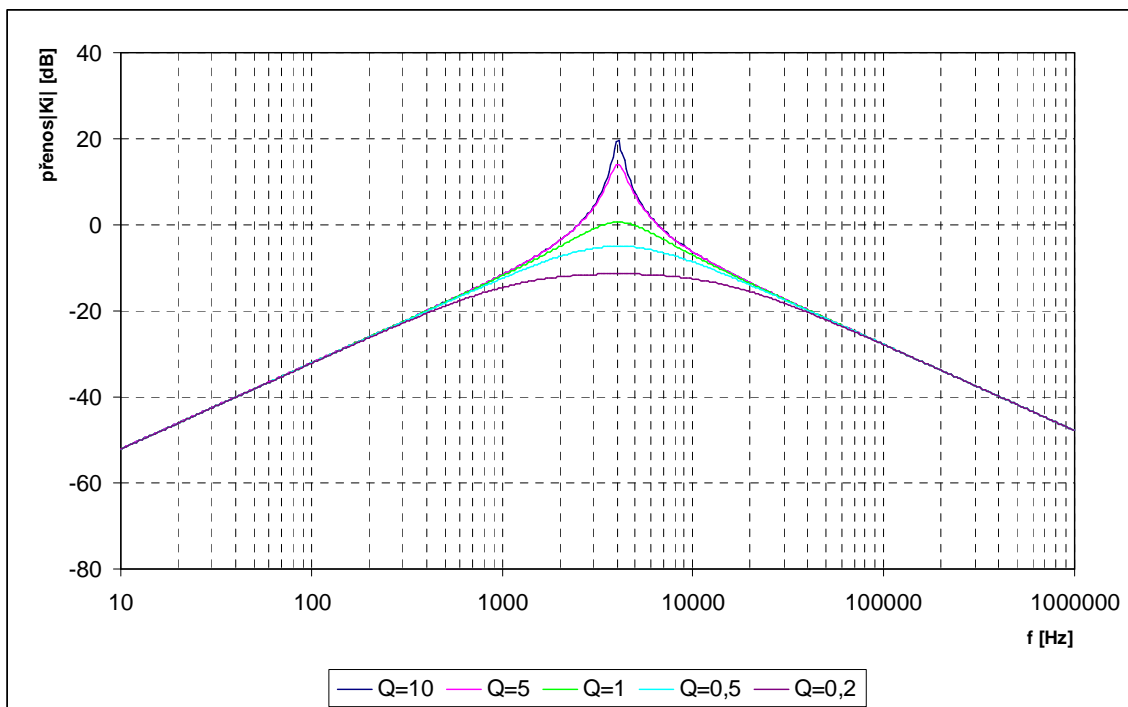
Hodnoty zesílení  $n$  byly voleny napěťově řízeným vstupem v rozmezí od 0,1V do 5V.

**Tab. 7-2** Tabulka určující převod mezi řídicím zesílením  $V_{set}$  a jakostí  $Q$  a mezním kmitočtem  $f$

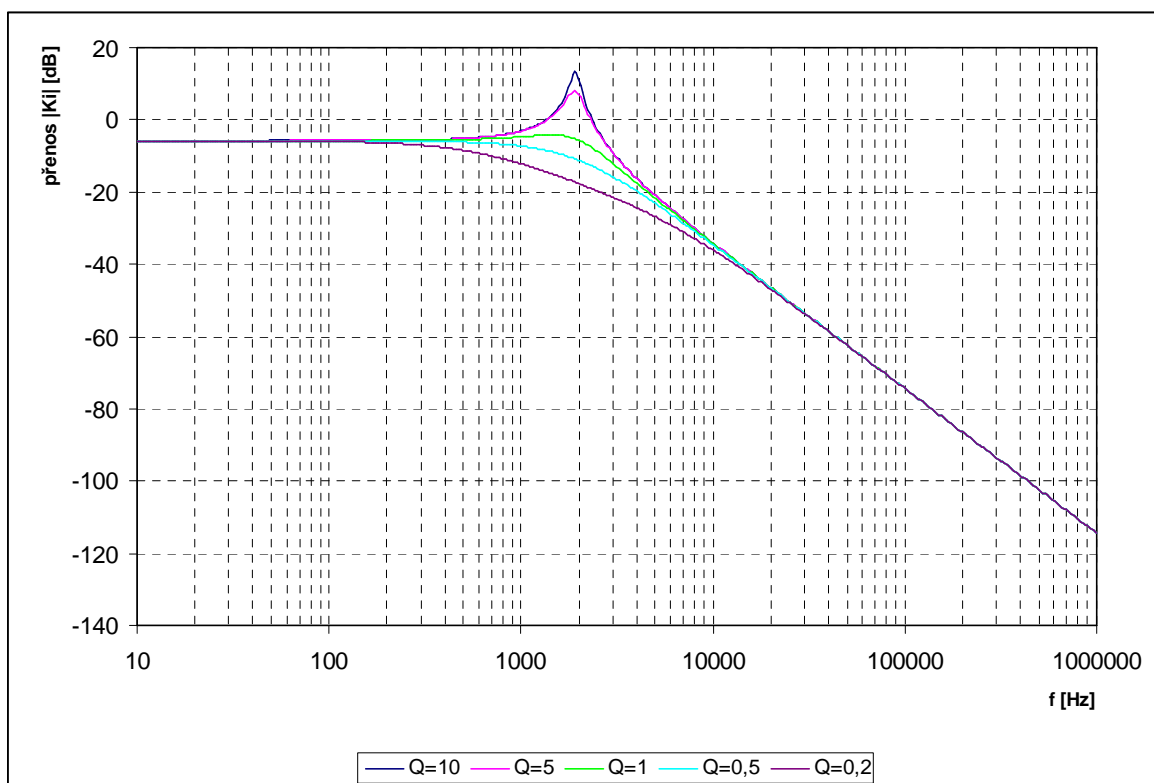
řídící napětí $V_{set1}[V]$	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
jakost filtru $Q [-]$	10	5	2	1	0,5	0,2	0,1
řídící napětí $V_{set2/3}[V]$	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
frekvence [Hz]	97,164	194,328	485,82	971,64	1943,28	4858,2	9716,4



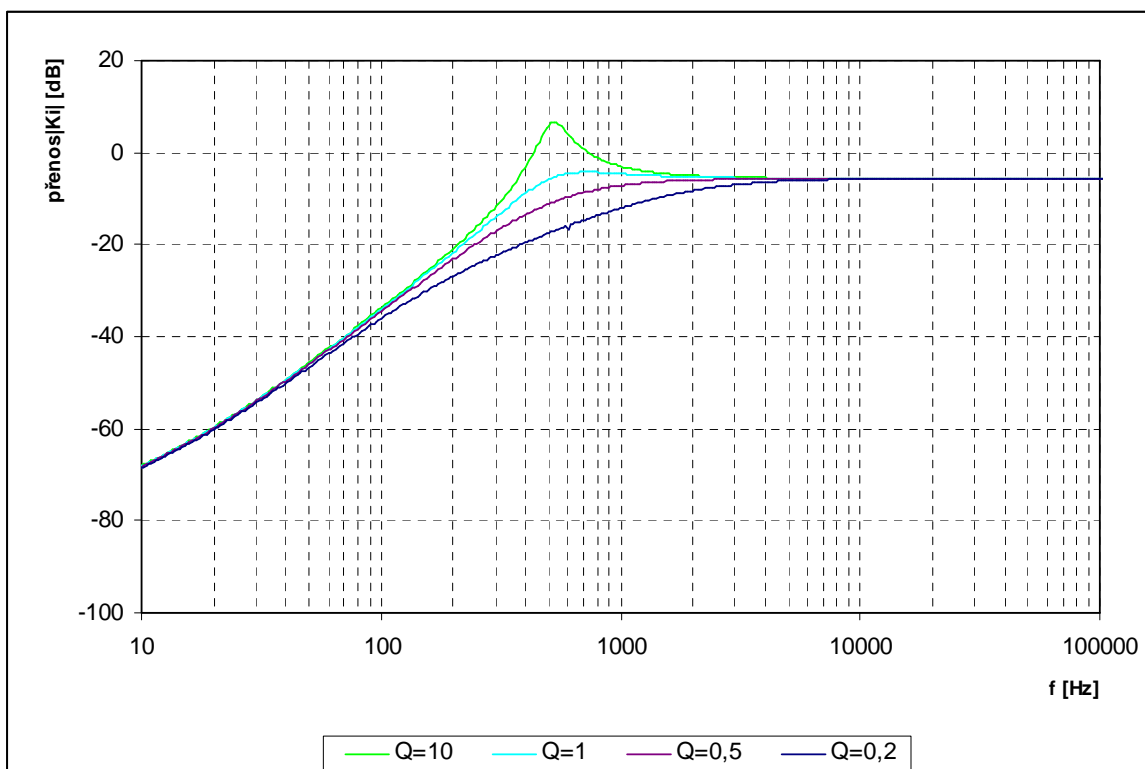
**Obr.7.2** Přenosové charakteristiky multifunkčního filtru pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočet  $f=970\text{Hz}$  a jakost  $Q=1$ .



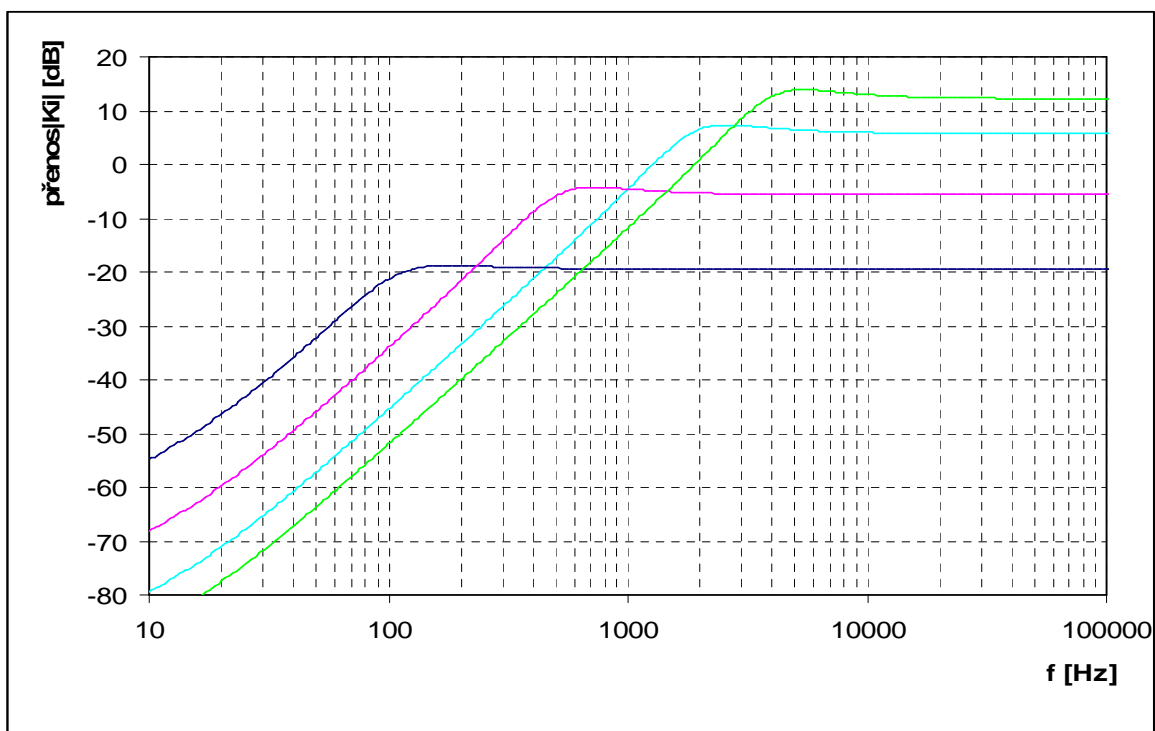
**Obr.7.3** Přenosové charakteristiky pásmové propusti pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočet  $f=4850\text{Hz}$  pro různé jakosti.



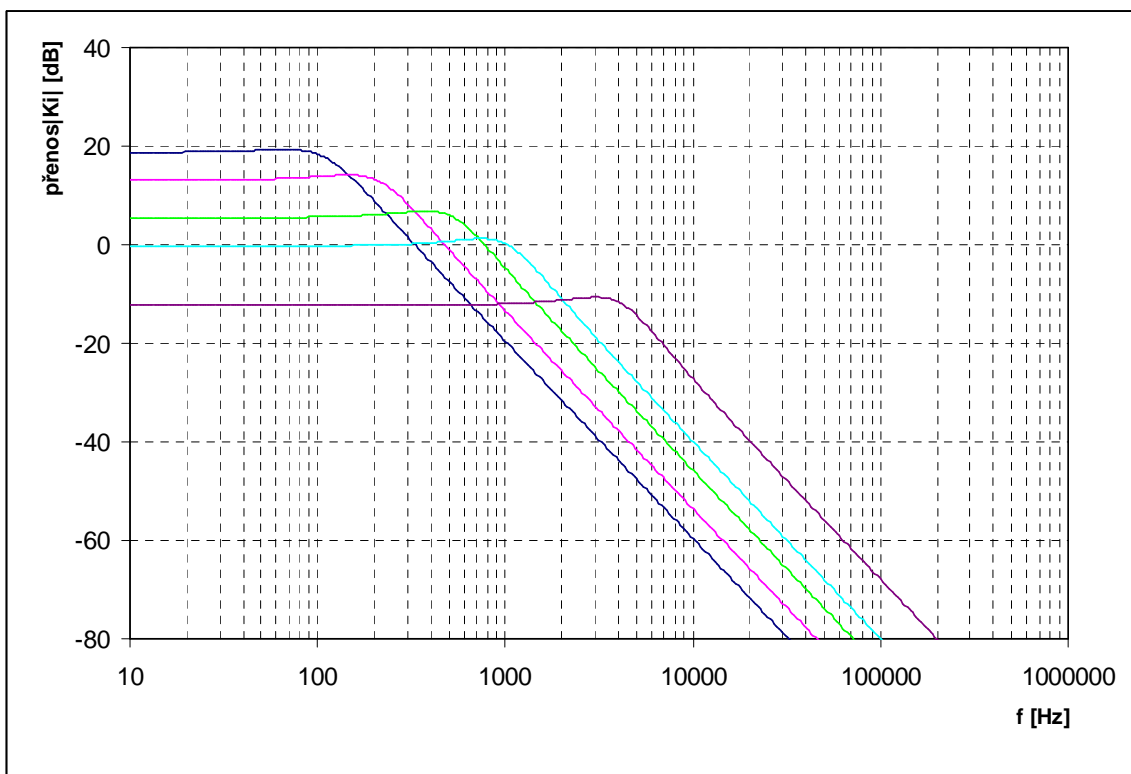
**Obr.7.4** Přenosové charakteristika dolní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočet  $f=1950\text{Hz}$  pro různé jakosti.



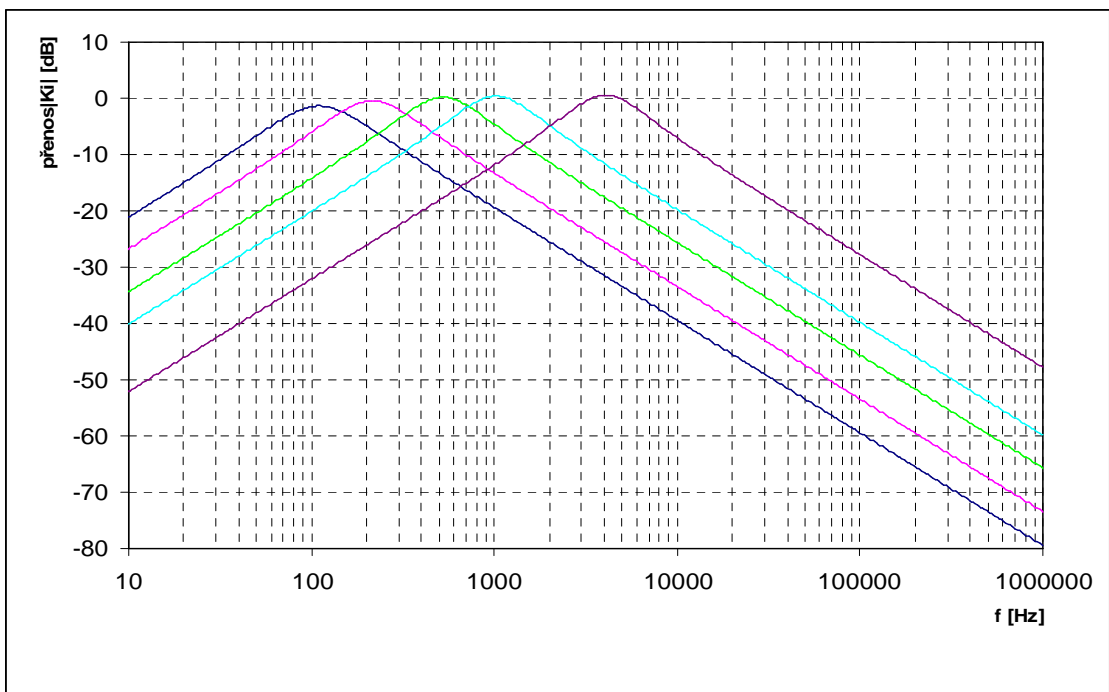
**Obr.7.5** Přenosové charakteristika horní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro mezní kmitočet  $f=485\text{Hz}$  pro různé jakosti.



**Obr.7.6** Přenosové charakteristika horní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro různé mezní kmitočty s jakostí  $Q=1$ .



**Obr.7.7** Přenosové charakteristika dolní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro různé mezní kmitočty s jakostí  $Q=1$ .



**Obr.7.8** Přenosové charakteristika pásmové propusti pracující v proudovém módu navrhované pro různé mezní kmitočty s jakostí  $Q=1$ .

## 7.2 Změřené hodnoty z výrobku

Měření bylo prováděno na analyzátoru s využitím převodníku napětí na proud a proudu na napětí z důvodu univerzálního filtru, který pracuje v proudovém módu a přístroje v napěťovém. U jednotlivých filtrů: horní propust, dolní propust a pásmovou propust bylo voleno zesílení umožňující řízení jakosti a mezního kmitočtu. Grafické znázornění pak shrnuje jednotlivé hodnoty filtru s konstantním mezním kmitočtem a změnou jakosti nebo s konstantní jakostí a změnou mezního kmitočtu.

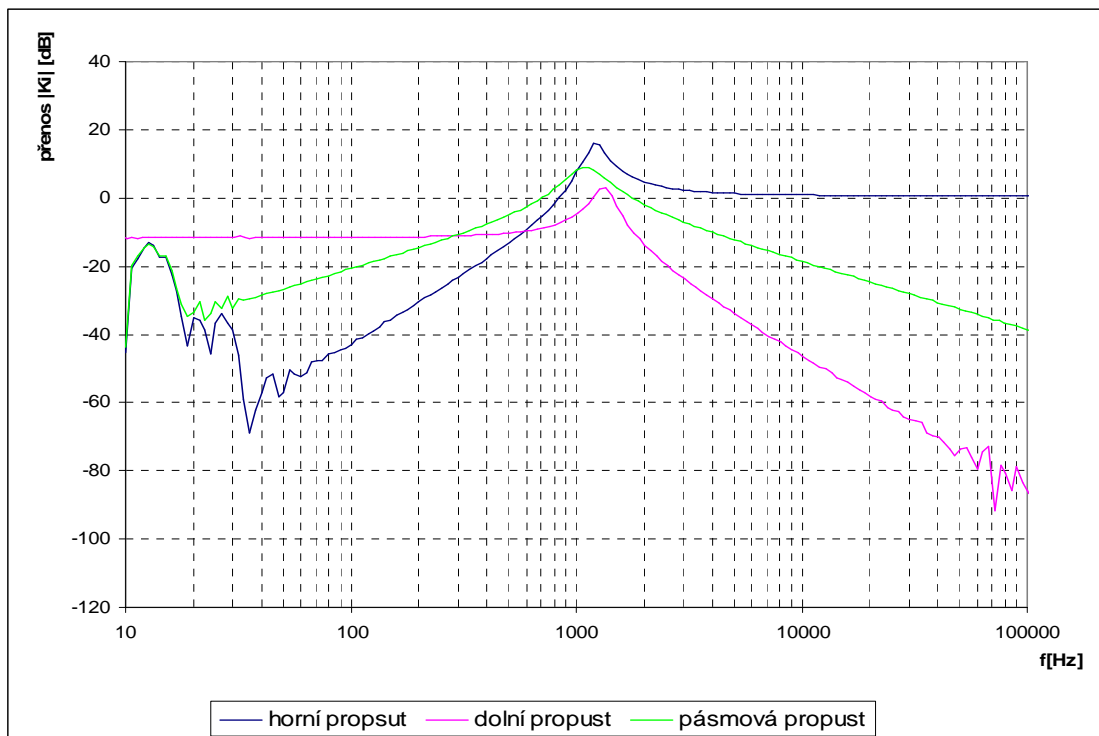
Dané měření je znázorněno v následujících grafech, kde obr.7.9 ukazuje jednotlivé typy filtrů při konstantní frekvenci a jakosti. Důvod zvlnění na začátku charakteristiky vysvětluje obr.7.10. Měření bylo nastaveno (z důvodu rychlejšího zpracování přístroje) na hodnotu 10Hz BANDWIDTH při nižší hodnotě se charakteristika na začátku měření přibližuje správné hodnotě. Horní propust obr.7.12 znázorňuje vlastnost filtru (projevuje se i v jiných charakteristikách), že při řízení kmitočtu dochází i k změně přenosu. Přenosová charakteristika obr.7.15 s mezním kmitočtem  $f = 485\text{Hz}$  poukazuje na chybu aktivního prvku EL 2082, který nejpřesněji pracuje v oblasti řízení zesílení 1V. Přenosové charakteristiky jednotlivých filtrů jsou měřeny podle vypočtených hodnot zesílení odpovídající hodnotám frekvence  $f$  od 485 do 4858 a jakosti  $Q$  od 0,2 do 10.

U pásmové propusti obr.7.13 bylo vypočtena odpovídajících (změřená) jakost  $Q$  (7.11) kterou můžeme porovnat podle předpokládané jakosti (7.9) tabulky

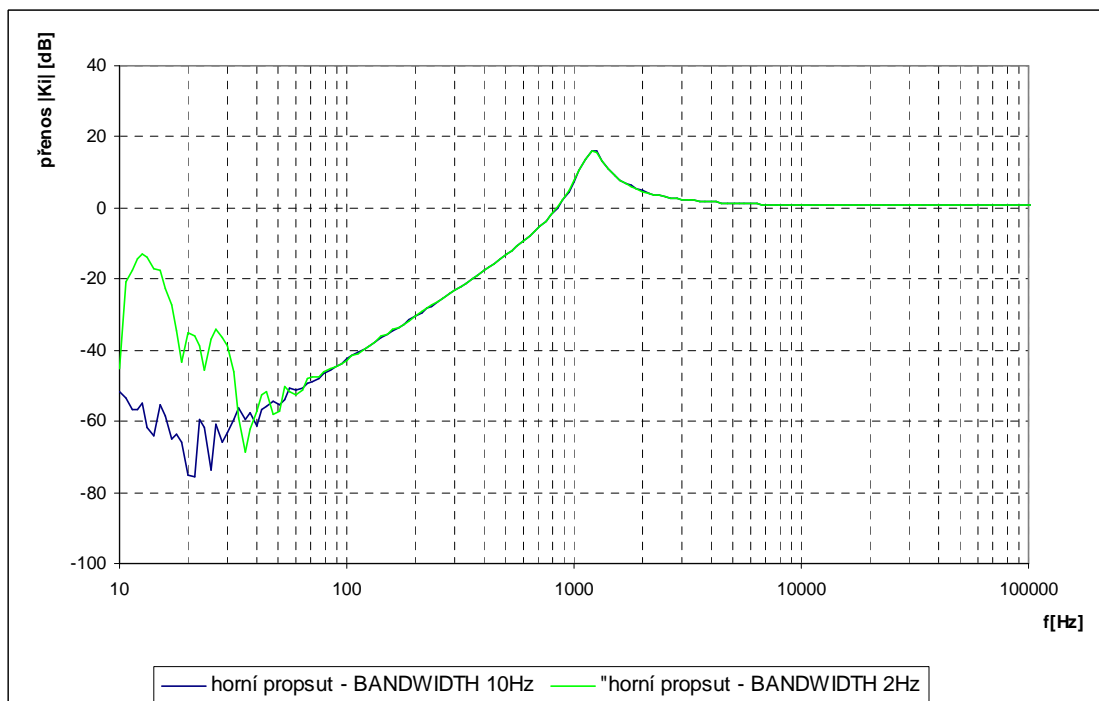
$$Q = f_0 / B \quad (7.11)$$

**Tab. 7-3** Tabulka porovnávající jakosti u pásmové propusti

Předpokládaná jakost $Q$ [-]	10	5	1	0,7
Změřená jakost $Q$ [-]	7,5	3,16	0,91	0,77

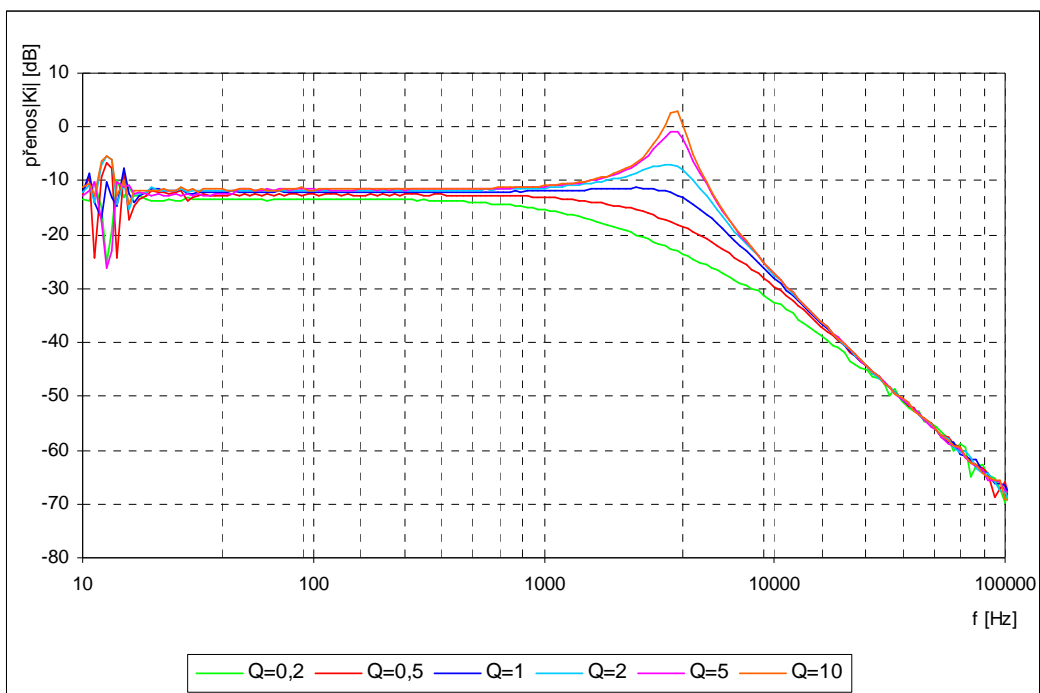


**Obr.7.9** Přenosové charakteristiky jednotlivých typů filtrů pracujících v proudovém módu navrhované pro různé jakosti  $Q=10$  a stejný kmitočet  $f$ .

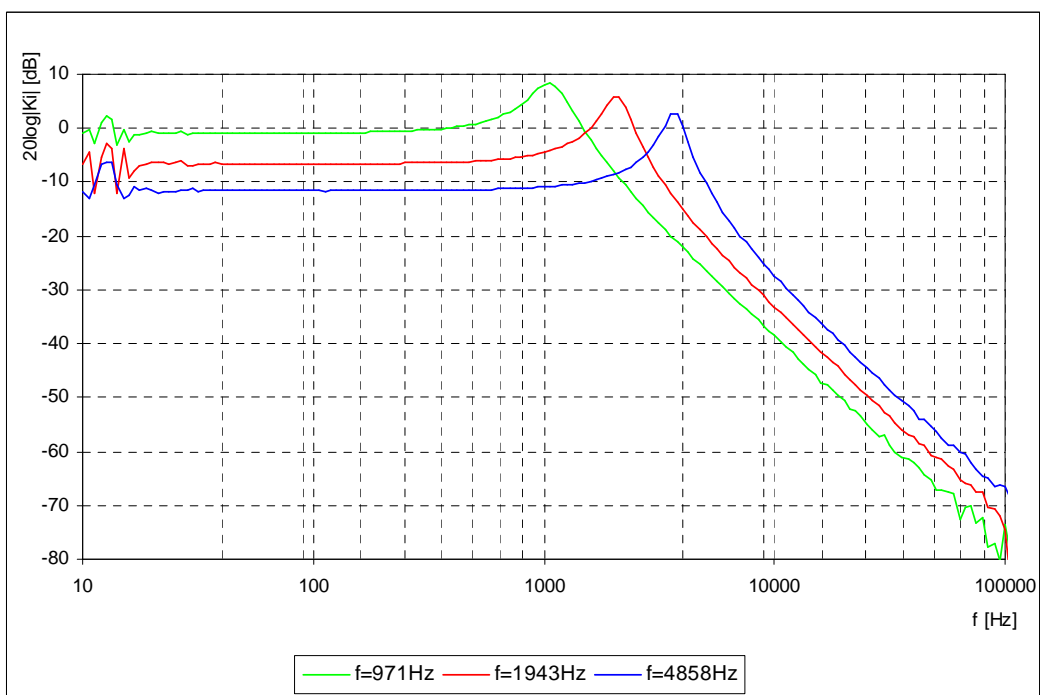


**Obr.7.10** Přenosové charakteristiky horní propusti pracujících v proudovém módu navrhované pro stejnou jakosti  $Q$  a kmitočet  $f$ .

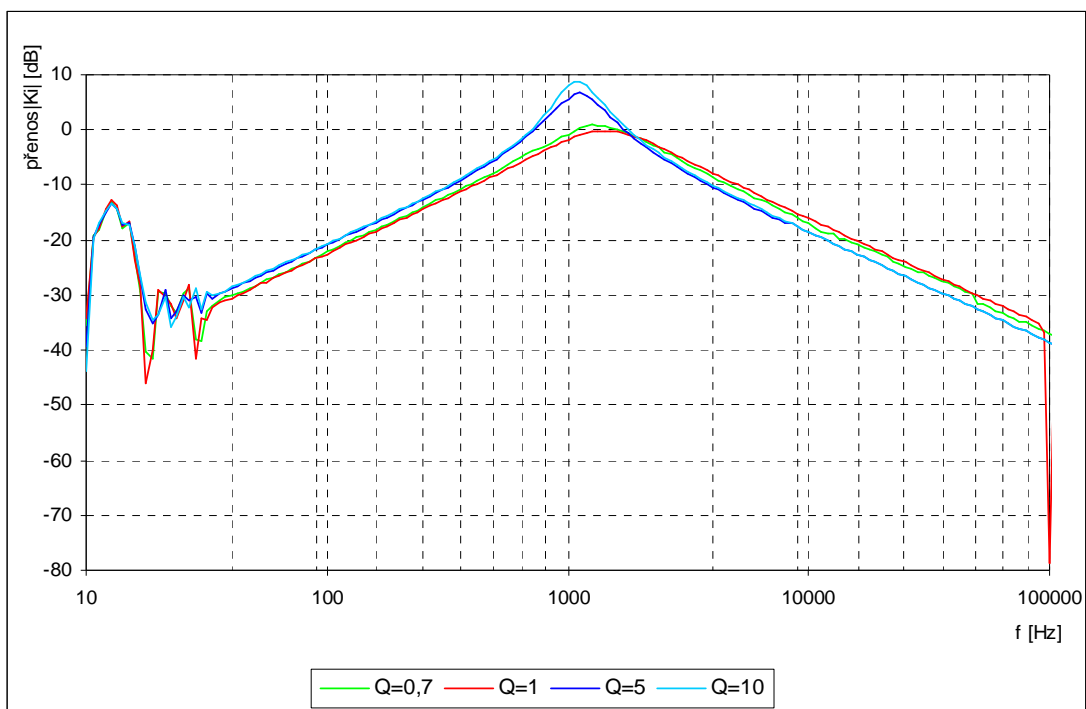




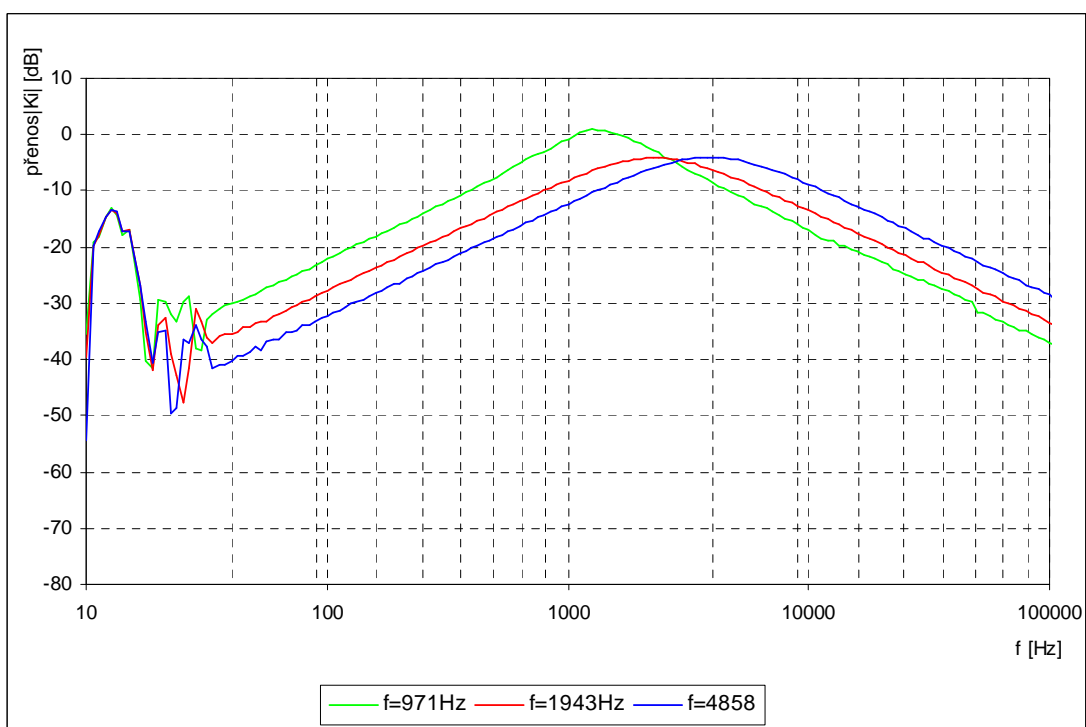
**Obr.7.11** Přenosové charakteristiky dolní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro různé jakosti a stejný kmitočet  $f=4858\text{Hz}$ .



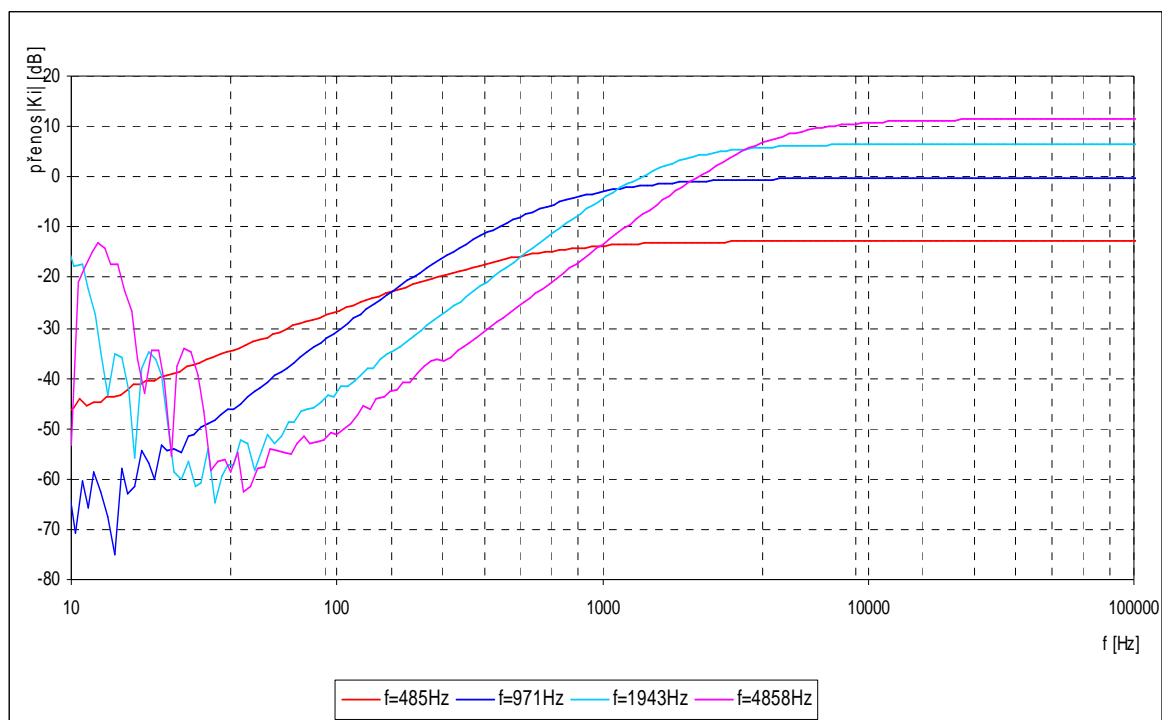
**Obr.7.12** Přenosové charakteristiky dolní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro jakost  $Q=10$  a různé kmitočty.



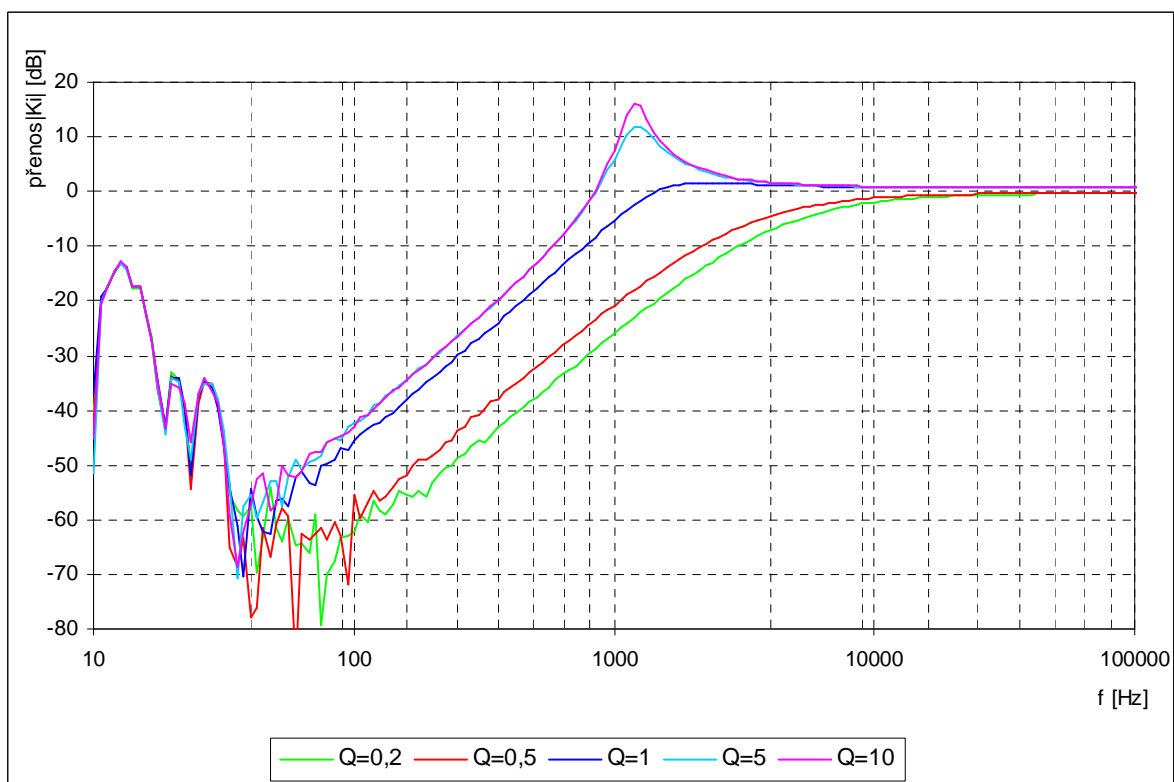
**Obr.7.13** Přenosové charakteristiky pásové propusti pracující v proudovém módu navrhované pro různé jakosti a konstantní kmitočet  $f=971\text{Hz}$ .



**Obr.7.14** Přenosové charakteristiky pásové propusti pracující v proudovém módu navrhované pro jakost  $Q=0,7$  a různé kmitočty.



**Obr.7.15** Přenosové charakteristiky horní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro jakost  $Q=0,7$  a různé kmitočty.



**Obr.7.16** Přenosové charakteristiky dolní propusti pracující v proudovém módu navrhované pro různé jakosti a stejný kmitočet.

## 8 Závěr

Úkolem diplomové práce bylo navržení kmitočtově řízeného filtru s proudovými aktivními prvky. Díky ředitelnému zesílení aktivního prvku je možné měnit základní parametry, jako je jakost a mezní kmitočet. Daný návrh byl realizován pomocí proudových konvektorů CC, vícevýstupových proudových slevačů MO-CF a digitálně řízených proudových zesilovačů DCCA.

V první části diplomové práce bylo seznámení se s aktivními proudovými prvky a jejich aplikacemi do kmitočtových filtrů. Tyto aktivní prvky pracují v proudovém módu, což oproti napětovému módu má řadu výhod. Díky tomu jsou jejich vlastnosti v současné době výhodné i kvůli dosahování širokého kmitočtového pásma. V proudovém módu tak můžeme dosáhnout další z výhod, jako je zachování dobrých šumových vlastností při snížení napájecího napětí a zvětšení rozsahu zpracovávaných frekvencí.

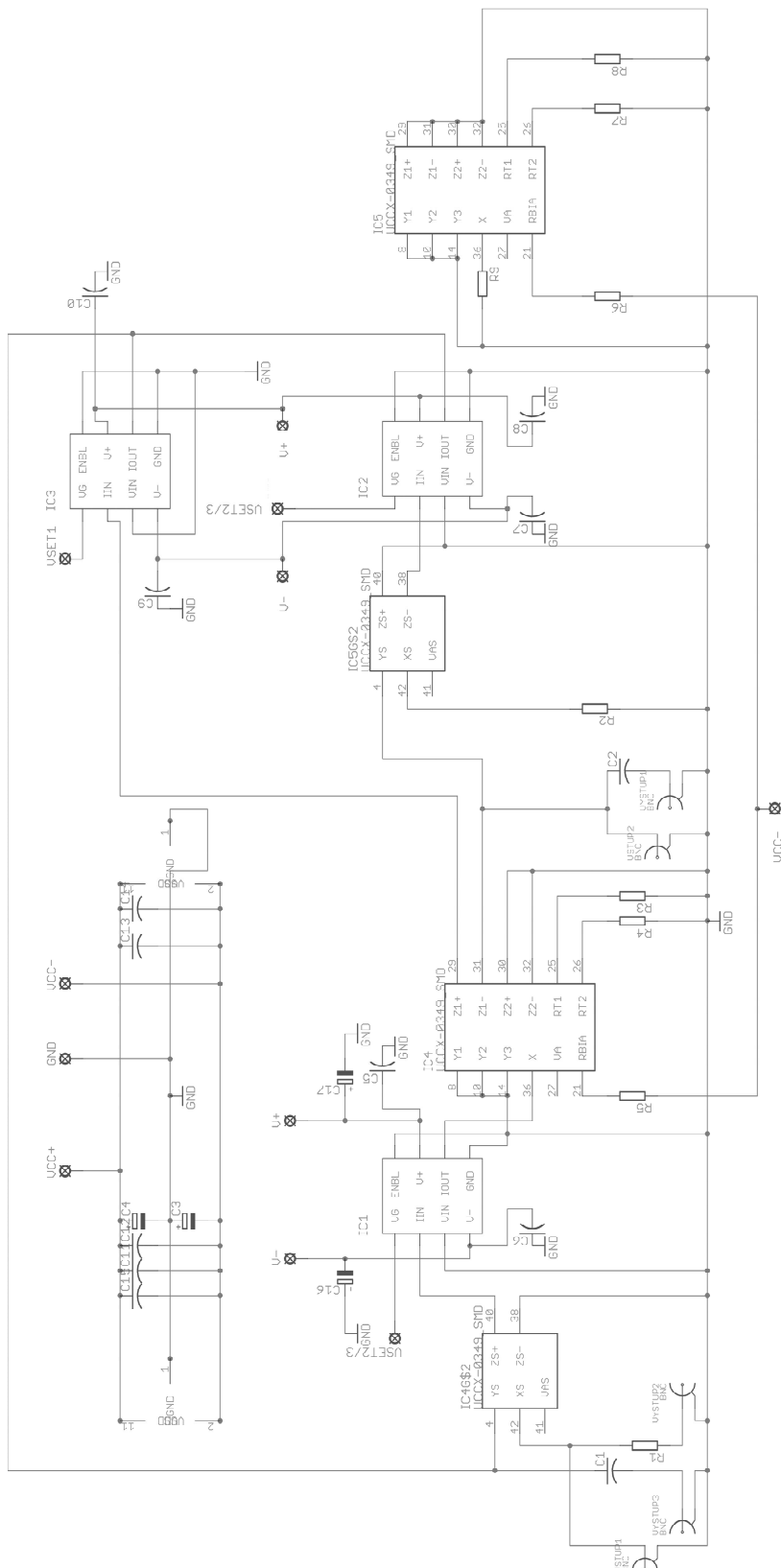
Při tomto studování byl použit postup metodou autonomních obvodů, kterými lze dané filtry sestavit. Na základě známých řešení autonomních obvodů se zobecněnými proudovými konvektory bylo navrženo možných multifunkčních filtrů. Tento návrh byl prováděn v programu SNAP, kde se i sestavovaly charakteristické rovnice a přenosové funkce daných filtrů. Podle nich byla provedena simulace charakteristik. Dané charakteristiky byly navrhovány pro filtry: horní, dolní, pásmovou propust.

Jeden z filtrů byl navržen s prvky proudových konvektorů s využitím digitálně řízených proudových zesilovačů DCCA. Díky nim pak bylo umožněno řízení jakosti a mezního kmitočtu nezávisle na sobě. Z důvodu nedostupnosti aktivního prvku DCCA byl daný aktivní prvek nahrazen aktivním prvkem EL 2082, který měl určité omezení, ale pro naše využití byl dostatečnou náhradou. Tyto filtry byly navrhovány a simulovány pro různé kmitočty, jakosti a typy filtrů. Odsimulovaný obvod byl poté navržen pro praktickou realizaci v programu EAGLE. Měření probíhalo pro různé typy filtrů s umožněním změny jakosti a mezního kmitočtu. Tyto hodnoty pak byly zaznamenány do grafického vyjádření s možností porovnání hodnot se simulovanými. Z daných grafů pak vyplývá, že navrhovaný univerzální filtr, který byl simulován v 3. úrovni se velmi podobá hodnotám změřeným v praktické realizaci. Určité chyby jsou způsobeny zvolením pasivních součástek, které byly voleny z řady E24 s tolerancí 5% a aktivního prvku EL 2082, který má pracovní oblast pro řízení zesílení nejpřesnější v oblasti blízké 1V.

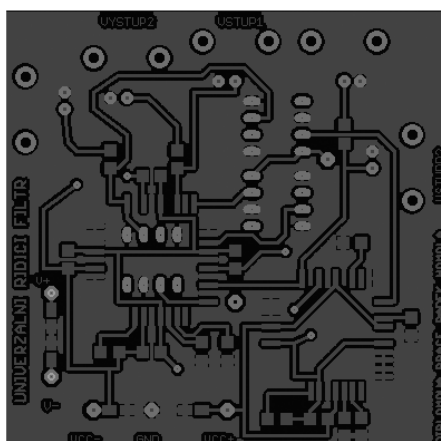
## **9 Seznam příloh**

V příloze jsou obrázky z výroby plošného desky:

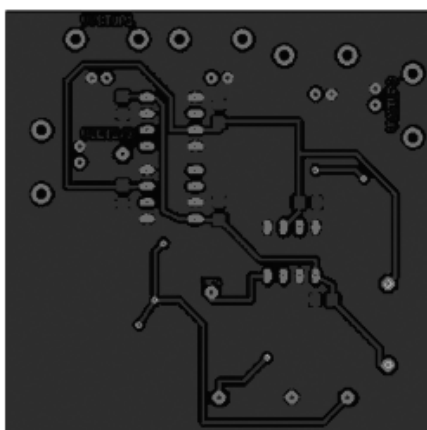
- schéma filtru který byl realizovaný v programu EAGLE 5.0.0,
- návrh desky znázorněné ze strany TOP a BOTTOM,
- osazení desky součástkami,
- fotografie hotového výrobku.



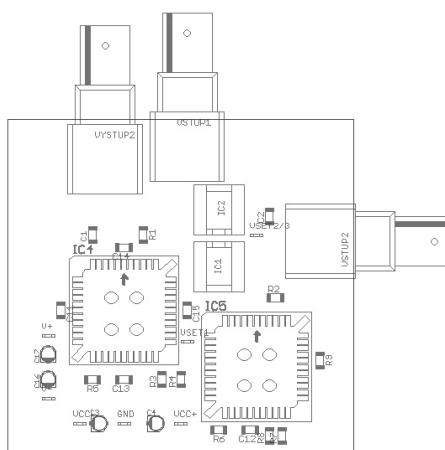
Obr. 9.1 Schématické znázornění součástek plošného spoje.



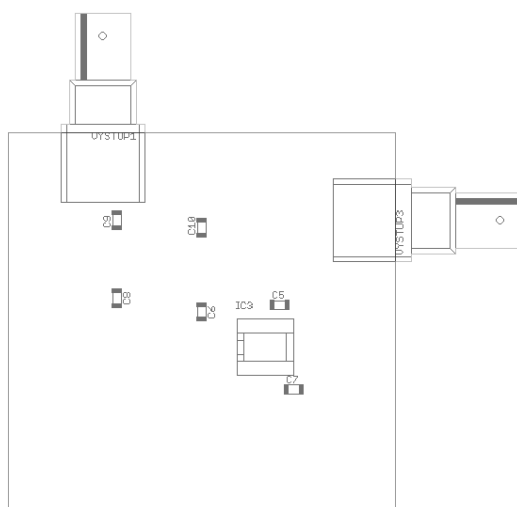
**Obr.9.2** Deska plošného spoje strana TOP .



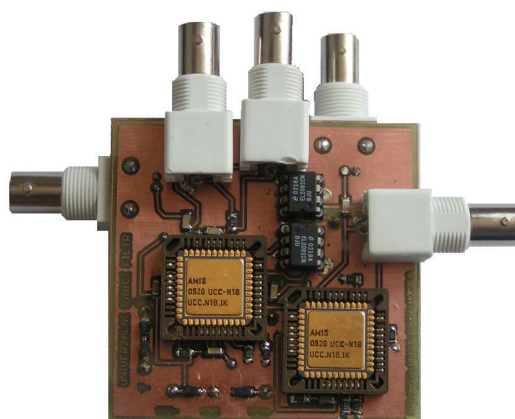
**Obr.9.3** Deska plošného spoje strana BOTTOM .



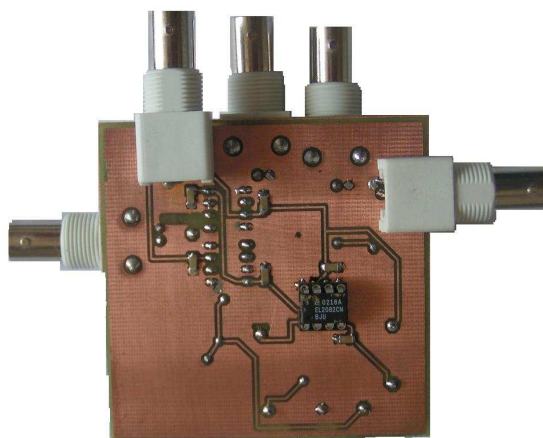
**Obr.9.4** Deska plošného osazení součástek TOP .



**Obr.9.5** Deska plošného osazení součástek strana *BOTTOM* .



**Obr.9.6** Deska plošného osazení součástek *TOP* .



**Obr.9.7** Deska plošného osazení součástek strana *BOTTOM* .



## Seznam literatury

- [1] Vrba K. – Vrba K.: Technika analogových obvodů a systémů. Skriptum. VUT v Brně, 1987
- [2] Filka a kol.: Diplomní semináře. Skriptum. VUT v Brně, 1992
- [3] Vrba K.: Vstupní obvody číslicových spektrálních analyzátorů a měřičů činitele přenosu. Knižnice VUT, svazek A-52, 1991
- [4] Kubánek D.: Kmitočtové filtry s proudovými a napěťovými konvejory. Disertační práce. VUT v Brně, 2005
- [5] Bečvář D.: Struktury proudových konvejšorů a jejich vlastnosti. [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz), č.2001/1 - 16.1.2001
- [6] Dostál T., Čajka J.: Nové názvosloví a sjednocující pohled na proudové konvejory, [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz), č.2001/24-28.5 2001
- [7] Bečvář D., Vrba K.: Univerzální proudový konvejšor, [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz), č.2000/7
- [8] Matějčček L., Olšák M., Vrba K.: Nový multifunkční filtr v proudovém módu, [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz), č.2002/39 - 23.10.2002
- [9] Bečvář D.: Napěťové konvejory, [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz), č.2001/51 - 13.12.2001
- [10] Bečvář D.: Nové typy invertujících proudových konvejšorů: ICCI a ICCIII, [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz), č.2000/4 - 12.1.2000
- [11] Čajka J., Dostál T., Vrba K.: Nové názvosloví a sjednocující pohled na proudové konvejory, [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz), č.2001/24 – 28.5.2001
- [12] Jeřábek J., Vrba K.: Vybrané vlastnosti univerzálního proudového konvejšoru, ukázka návrhu aplikace, [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz), č. 24.10.2006
- [13] Gregořica M.: Návrh multifunkčního obvodu s proudovými konvejory druhé generace, [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz), č.2002/56 – 18.11.2002
- [14] Čajka J.: Obecný tříbranový proudový konvejšor a jeho využití při návrhu obvodů RC, [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz), č.2000/2 – 6.1.2000
- [15] Šponar R.: Syntetické dvojpólové prvky s imitacemi vyšších řádů v kmitočtových filtrech s proudovými konvejory, [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz), č.2004/13 -12.3.2004
- [16] Koton J., Vrba K.: Návrh kmitočtového filtrů pomocí autonomního obvodu s úplnou sítí admitancí, [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz), č. 2005/33 – 7.6.2005
- [17] Vrba K.: Univerzální aktivní obvodové prvky a jejich aplikace, Výzkumná zpráva GAČR, FEKT VUT Brno, 2002
- [18] Pospíšil J., Dostál T. Teorie elektronických obvodů, Skripta VUT, Brno 1997
- [19] Olšák, M., Vrba, K., Čajka, J. Transformační články pro realizaci přeladitelných imitancí vyššího řádu, Internetový časopis [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz), 2002/65 , 5.12.2002
- [20] Kolka Z.: Analýza elektronických obvodů programem OrCAD PSpice, Skripta VUT, Brno
- [21] Biolek D. Řešíme elektrické obvody, BEN – technická literatura, Praha 2004
- [22] Koton J., Vrba K. Zobecněné metody návrhu kmitočtových filtrů, [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz) č.2008/26 -30.07.2008

[23] KUBÁNEK, D.; VRBA, K. State-Variable Higher-Order Filters with Differential Input/Output Current Followers. /International Transaction on Computer Science and Engineering,/2008, Vol. 49, No. 1, s. 186-196. ISSN: 1738-6438.

[24] KOTON, J.: Vlastnosti filtrů s universálními proudovými konveji, diplomová práce, V Brně 2005